

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

**AUTONOMNÍ PORUCHOVÝ ZÁZNAMNÍK  
NAVRŽENÝ PRO DISTRIBUČNÍ TRAFOSTANICE**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE  
AUTHOR**

**BC. MICHAL GABORČÍK**

**BRNO 2014**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektroenergetika**

**Student:** Bc. Michal Gaborčík

**ID:** 125426

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

**Autonomní poruchový záznamník navržený pro distribuční trafostanice**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rekapitulace metod pro analýzu poruchových stavů
2. Zhodnocení způsobu provozu distribučních trafostanic pro volbu optimální konfigurace poruchového záznamníku
3. Navržení autonomního poruchového záznamníku pro instalaci do trafostanic VN/NN
4. Vývoj analytického SW pro poruchový záznamník
5. Provozní ověření funkce poruchového záznamníku
6. Optimalizace záznamníku na základě poznatků zjištěných během provozních zkoušek

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 23.5.2014

**Vedoucí práce:** Ing. David Topolánek, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

GABORČÍK, M. Autonomní poruchový záznamník navržený pro distribuční trafostanice. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2014, 64 stran.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Davidu Topolánkovi, Ph.D. za vedení práce a cenné připomínky a také svým rodičům za veškerou dosavadní podporu.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky**

**Diplomová práce**

# **Autonomní poruchový záznamník navržený pro distribuční trafostanice**

**Bc. Michal Gaborčík**

**vedoucí: Ing. David Topolánek, Ph.D.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2014**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**Faculty of Electrical Engineering and Communication  
Department of Electrical Power Engineering**

**Master's Thesis**

**Autonomic fault recorder designed for  
a distribution transformer station  
MV/LV**

**by**

**Bc. Michal Gaborčík**

**Supervisor: Ing. David Topolánek, Ph.D.**

**Brno University of Technology, 2014**

**Brno**

---

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá realizací poruchového záznamníku navrženého pro distribuční trafostanice. V teoretické části je zpracována rešerše týkající se provozu distribučních trafostanic a analytických metod, na základě kterých lze detekovat poruchu v elektrické síti. V praktické části je proveden návrh a realizace záznamníku v prostředí LabVIEW a s použitím měřicí platformy CompactDAQ. Účelem poruchového záznamníku je monitorování a zaznamenávání průběhů napětí a proudů na sekundární straně trafostanice během poruchy v síti vysokého napětí. Princip detekce poruchy je primárně založený na monitorování úrovně zpětné složky napětí. Poruchový záznamník byl postupně optimalizován a jeho finální verze je v práci prezentována. Závěr práce se věnuje ověření funkčnosti navrženého systému na simulované poruše v modelu sítě vysokého napětí.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** poruchový záznamník; distribuční trafostanice; síť vysokého napětí; síť nízkého napětí; analýza poruch v distribuční síti; LabVIEW; CompactDAQ

---

**ABSTRACT**

This master's thesis deals with realization of fault recorder designed for a distribution transformer station. In theoretical part is created research about operation of distribution transformer stations and about analytic methods, which gives bases for fault detection in power network. The practical part consists of design and realization of fault recorder in LabVIEW interface using CompactDAQ measurement platform. Purpose of this recorder is monitoring and recording of voltage and current waveforms on secondary side of transformer station during the fault in high voltage network. Principle of fault detection is primarily based on level monitoring of voltage negative symmetrical component. Fault recorder has been successively optimized and the final version is presented in this thesis. At the end functionality of designed system is evaluated on simulated fault in a model of high voltage network.

**KEY WORDS:** fault recorder; distribution transformer station; high voltage network; low voltage network; fault analysis in distribution network; LabVIEW; CompactDAQ

# OBSAH

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ:</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM TABULEK:</b> .....	<b>12</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>13</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>15</b>
<b>2 PROVOZ DTS 22/0,4 KV</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 ŘEŠENÍ ZAPOJENÍ DTS 22/0,4 KV</b> .....	<b>16</b>
2.1.1 SPOJENÁ UZEMNĚNÍ.....	17
2.1.2 ROZDĚLENÁ UZEMNĚNÍ .....	18
<b>2.2 DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTORY 22/0,4 KV</b> .....	<b>19</b>
2.2.1 PŘEVOD A REGULACE DT 22/0,4 KV .....	20
2.2.2 ZAPOJENÍ VINUTÍ DT 22/0,4 KV .....	20
<b>3 ANALYTICKÉ METODY PRO PORUCHOVÉ STAVY V DS</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1 OBECNÁ TEORIE</b> .....	<b>22</b>
3.1.1 FOURIEROVA TRANSFORMACE .....	22
3.1.2 FÁZORY .....	25
3.1.3 TEORIE SOUMĚRNÝCH SLOŽEK .....	25
<b>3.2 FÁZOROVÁ ANALÝZA</b> .....	<b>27</b>
<b>3.3 ANALÝZA POUŽITÍM SOUMĚRNÝCH SLOŽEK</b> .....	<b>28</b>
<b>3.4 RMS ANALÝZA</b> .....	<b>28</b>
<b>3.5 HARMONICKÁ ANALÝZA</b> .....	<b>28</b>
<b>3.6 ANALÝZA DOTYKOVÝCH NAPĚTÍ</b> .....	<b>29</b>
<b>4 NÁLEŽITOSTI PORUCHOVÉHO ZÁZNAMNÍKU</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1 POPIS SOUČASNĚ POUŽÍVANÝCH PRŮMYSLOVÝCH SYSTÉMŮ PZ</b> .....	<b>30</b>
<b>4.2 ZPRACOVÁNÍ DAT</b> .....	<b>31</b>
4.2.1 VZORKOVÁNÍ.....	31
4.2.2 FILTRACE .....	32
4.2.3 ČASOVÉ OKNA .....	33
<b>4.3 MONITOROVÉ VELIČINY</b> .....	<b>33</b>
<b>4.4 METODY DETEKCE PORUCHOVÝCH STAVŮ A APLIKACE SPOUŠTĚ</b> .....	<b>34</b>
<b>4.5 METODY ZAZNAMENÁVÁNÍ PRŮBĚHŮ PORUCH</b> .....	<b>35</b>
<b>5 NÁVRH ŘEŠENÍ PORUCHOVÉHO ZÁZNAMNÍKU</b> .....	<b>37</b>
<b>5.1 VSTUPY PRO PORUCHOVÝ ZÁZNAMNÍK</b> .....	<b>37</b>
<b>5.2 NÁVRH USPOŘÁDÁNÍ A FUNKCE SYSTÉMU PZ</b> .....	<b>38</b>
<b>5.3 NÁVRH ALGORITMU PRO VYHODNOCENÍ PORUCHOVÉHO STAVU</b> .....	<b>38</b>
<b>5.4 ZÁZNAM DAT</b> .....	<b>40</b>
<b>6 LABVIEW A COMPACTDAQ</b> .....	<b>41</b>

---

6.1 UŽIVATELSKÉ ROZHŘANÍ.....	41
6.2 COMPACTDAQ.....	42
7 OPTIMALIZACE A ROZŠÍŘENÍ FUNKCÍ PORUCHOVÉHO ZÁZNAMNÍKU .....	43
7.1 NÁVRH DALŠÍCH OPTIMALIZACÍ A ÚPRAV PRO BUDOUCÍ POUŽITÍ .....	44
8 POPIS NAVRŽENÉHO PORUCHOVÉHO ZÁZNAMNÍKU .....	46
8.1 NASTAVENÍ PORUCHOVÉHO ZÁZNAMNÍKU PŘED SPUŠTĚNÍM.....	46
8.2 NASTAVENÍ PORUCHOVÉHO ZÁZNAMNÍKU – TRIGGER .....	48
8.3 VÝSTUPY PORUCHOVÉHO ZÁZNAMNÍKU .....	50
9 OVĚŘENÍ FUNKCE PORUCHOVÉHO ZÁZNAMNÍKU .....	52
9.1 POPIS MODELU SÍTĚ A ZAPOJENÍ ZAŘÍZENÍ.....	52
9.2 POPIS POSTUPU MĚŘENÍ A NASTAVENÍ ZAŘÍZENÍ .....	54
9.3 VYHODNOCENÍ ZÁZNAMU PORUCHOVÉHO ZÁZNAMNÍKU NA STRANĚ NN .....	55
9.4 VYHODNOCENÍ ZÁZNAMU OSCILOSKOPEM YOKOGAWA NA STRANĚ VN .....	58
10 ZÁVĚR.....	61
POUŽITÁ LITERATURA .....	63

**SEZNAM OBRÁZKŮ:**

<i>Obr. 2 - 1: Spojená uzemnění - porucha na straně vn .....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2 - 2: Spojená uzemnění - porucha na straně nn .....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2 - 3: Dovolené dotykové napětí v závislosti na době trvání poruchového proudu .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2 - 4: Oddělená uzemnění – porucha na straně vn .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2 - 5: Oddělená uzemnění – porucha na straně nn .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2 - 6: Schéma zapojení transformátorů vn/nn .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3 - 1: Algoritmus FFT pro <math>N=8</math> .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3 - 2: Signál v časové oblasti <math>x(t)</math> a jeho FFT .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3 - 3: Estimátor základní harmonické na principu DFT .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3 - 4: Rotující fázor a harmonické napětí .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3 - 5: Rozklad třífázového nesymetrického napětí do složkové soustavy .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3 - 6: Příklad fázorového diagramu pro stav sítě před poruchou .....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4 - 1: Podsystemy digitálního poruchového záznamníku .....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 4 - 2: Zkreslení digitální filtrace .....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4 - 3: Oscilografický záznam proudů během poruchové události .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5 - 1: Zjednodušené schéma měřících vstupů PZ .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5 - 2: Tok dat mezi jednotlivými podsystemy .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5 - 3: Diagram algoritmu vyhodnocování poruchového stavu .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 6 - 1: Náhled čelního panelu a blokového diagramu .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6 - 2: NI CompactDAQ šasi a vložené měřicí karty .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 8 - 1: Náhled okna nastavení kanálů poruchového záznamníku .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 8 - 2: Náhled oken se zobrazením okamžitých průběhů napětí a napěťového spektra .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 8 - 3: Náhled okna nastavení triggeru a záznamu poruchového záznamníku .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 8 - 4: Náhled okna se zaznamenanými průběhy .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 9 - 1: Schéma zapojení měřeného modelu sítě vn/nn a měřících zařízení .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 9 - 2: Sestavený model sítě s měřícími zařízeními .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 9 - 3: Průběh efektivní hodnoty zpětné složky napětí <math>U_2</math> během poruchy .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 9 - 4: Zaznamenané průběhy napětí (<math>U_{L1}</math>, <math>U_{L2}</math>, <math>U_{L3}</math>) během poruchy .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 9 - 5: Zaznamenané průběhy proudů (<math>I_{L1}</math>, <math>I_{L2}</math>, <math>I_{L3}</math>) během poruchy .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 9 - 6: Zaznamenaný průběh poruchového proudů (<math>I_f</math>) během poruchy .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 9 - 7: Zaznamenaný průběh efektivní hodnoty poruchového proudů (<math>I_f</math>) během poruchy .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 9 - 8: Zaznamenaný průběh změn potenciálu na uzemnění (<math>U_E</math>) a dotykového napětí (<math>U_{dot}</math>) .....</i>	<i>57</i>

---

<i>Obr. 9 - 9: Detail vybraných průběhů zaznamenaných PZ v okamžiku vzniku poruchy.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 9 - 10: Zaznamenané průběhy napětí (<math>U_{L1,p}</math>, <math>U_{L2,p}</math>, <math>U_{L3,p}</math>) během poruchy .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 9 - 11: Zaznamenané průběhy napětí (<math>I_{L1,p}</math>, <math>I_{L2,p}</math>, <math>I_{L3,p}</math>) během poruchy.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 9 - 12: Zaznamenané průběhy proudů (<math>I_{L1,p}</math>, <math>I_{sh}</math>, <math>I_L</math>, <math>I_f</math>) během poruchy.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 9 - 13: Detail vybraných průběhů v okamžik vzniku poruchy.....</i>	<i>60</i>

**SEZNAM TABULEK:**

<i>Tab. 2 - 1: Příklad parametrů vybraných transformátorů</i> .....	19
<i>Tab. 2 - 2: Rozsah výstupních fázových napětí DT 22/0,4 kV</i> .....	20
<i>Tab. 4 - 1: Typicky používané vzorkovací poměry a frekvenčně harmonický rozsah</i> .....	32
<i>Tab. 4 - 2: Časové okna</i> .....	33
<i>Tab. 8 - 1: Náhled části výstupního souboru s naměřenými hodnotami</i> .....	50
<i>Tab. 8 - 2: Náhled výstupního souboru s nastaveními</i> .....	51
<i>Tab. 9 - 1: Převodní poměry pro model sítě</i> .....	52
<i>Tab. 9 - 2: Rekapitulace nastavení záznamových přístrojů</i> .....	54

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka
$a$	operátor natočení	-
$e$	Eulerovo číslo	-
$f_{max}$	maximální frekvence vzorkování	Hz, kHz
$f_s$	frekvence vzorkování	Hz, kHz
$h$	řád harmonické	-
$j$	imaginární číslo	-
$m$	velikost vzorkovacího okna	-
$t$	čas	s
$F$	determinant matice	-
$I$	elektrický proud	A
$I^{(0)}$	netočivá složka proudu	A
$I^{(1)}$	sousledná složka proudu	A
$I^{(2)}$	zpětná složka proudu	A
$I_f$	zbytkový proud zemní poruchy	A
$N$	počet prvků/intervalů	-
$P$	činný výkon	W, kW
$R$	elektrický odpor	$\Omega$
$R_E$	celkový zemní odpor společného uzemnění	$\Omega$
$R_{PEN}$	odpor uzemnění PEN vodiče	$\Omega$
$R_{ZS}$	odpor uzemnění transformační stanice	$\Omega$
$S$	zdánlivý výkon	VA, kVA
$THD$	celkový harmonický činitel zkreslení	%
$T_s$	perioda vzorkování	s
$t_{vyp}$	doba vypnutí poruchy	s
$U$	elektrické napětí	V
$U^{(0)}$	netočivá složka napětí	V
$U^{(1)}$	sousledná složka napětí	V
$U^{(2)}$	zpětná složka napětí	V
$U_{dot}$	dotykové napětí	V
$U_E$	napětí navýšení potenciálu zemnicí soustavy	V
$U_f$	fázová hodnota napětí	V
$U_m$	amplituda napětí	V
$U_{ZS}$	napětí na ochranném uzemnění	V
$V$	potenciál (označení dle norem ČSN)	V
$Z$	impedance	$\Omega$
$\psi$	počáteční fázový úhel	rad
$\omega$	uhlová frekvence	rad.s-1
arctg	arkus tangens	
cos	kosinus	
nn	nízké napětí	
sin	sinus	

---

vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
y	spojení sekundárního vinutí transformátoru do hvězdy
A/D	analogovo/digitální
ČR	Česká republika
ČSN	česká technická norma
D	spojení primárního vinutí transformátoru do trojúhelníku
DFR	digitální poruchový záznamník
DFT	diskrétní Fourierova transformace
DS	distribuční soustava
DT	distribuční transformátor
DTS	distribuční trafostanice
ES	elektrizační soustava
FFT	rychlá Fourierova transformace
Im	imaginární složka
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
N	nulový vodič
NI	National Instruments
PE	ochranný vodič
PEN	vodič se sloučenou funkcí ochranného a nulového vodiče
PZ	poruchový záznamník
Re	reálná složka
RMS	efektivní hodnota
TN-C	síť se sloučenou funkcí ochranného a nulového vodiče
TN-C-S	část sítě se sloučenou funkcí ochranného a nulového vodiče a část sítě s oddělenou
TN-S	síť s oddělenou funkcí ochranného a nulového vodiče

# 1 ÚVOD

Monitorování elektrických veličin v elektrických sítích patří k elektrotechnice, jako takové, již od prvopočátku vývoje elektrických zařízení. K provozu každé elektrické sítě nicméně patří i její poruchy a abnormální stavy a proto byly zavedeny systémy pro zvýšení efektivity provozu, kontroly a chránění sítě. Účelem každého tohoto systému je především udržení integrity a stability sítě, zároveň také cílí k dosažení vyšší spolehlivosti dodávky elektrické energie. Z tohoto důvodu jsou instalované jistící a ochranné prvky, které byly postupem času rozšířené i o zařízení pro monitorování a záznam průběhů poruchových jevů. Na základě takto získaných záznamů lze provést analýzu průběhu poruch, díky které lze získat řadu cenných informací o chování sítě během poruchy, správnosti funkce ochran, jištění atd. Celkově tato zaznamenávací zařízení přispívají k pochopení fenoménu přechodných jevů a vyvození patřičných důsledků.

Protože existuje celá řada možností praktického využití záznamů poruchových jevů na hladině nízkého napětí je tato práce věnována návrhu a realizaci funkčního poruchového záznamníku pro distribuční trafostanice vn/nn, schopného autonomního provozu. Účelem tohoto záznamníku je monitorování a zaznamenávání napěťových a proudových poměrů na sekundární straně distribučního transformátoru a dotykových napětí v trafostanici během poruchy v síti vysokého napětí. Samotný návrh respektuje způsob provozu distribučních trafostanic a využívá analytických metod, jejichž výstupy vedou k detekci poruchového stavu. Tento navržený systém je realizován na měřicí platformě NI CompactDAQ spolupracující se softwarovou platformou LabVIEW. Poruchový záznamník byl následně na základě četných provozních zkoušek postupně upraven a optimalizován tak, aby byl dosažen jeho stabilní chod. Finální verze záznamníku je v práci podrobně prezentována. V závěru této práce je provedeno ověření funkčnosti navrženého poruchového záznamníku na simulované poruše v modelu sítě vysokého napětí.

## 2 PROVOZ DTS 22/0,4 kV

Distribuční trafostanice (DTS) 22/0,4 kV jsou nedílnou součástí distribuční soustavy vzhledem k tomu, že transformací na hladinu nízkého napětí (nn) lze zajistit rozvod elektrické energie maloodběratelům a domácnostem. Tyto DTS jsou napájeny prostřednictvím venkovních a kabelových vedení z distribučních sítí vysokého napětí (vn) o napěťové hladině 22 kV. Téměř výhradně jsou tyto sítě provozovány paprskově případně průběžným rozvodem. Provoz napájené distribuční sítě nn 0,4 kV je obvykle určen stavem a typem napájené aglomerace. V oblastech s nízkou a střední hustotou zatížení jsou provozovány paprskovým nebo průběžným rozvodem. V oblastech s vysokou hustotou zatížení se sítě provozují jako mřížové. Kromě transformátorů je obvykle DTS vybavena rozváděči vn a nn, měřením, někdy i dálkovým ovládním a řídicí technikou.

Pro charakterizaci jednotlivých částí rozvodu elektrické energie je určující jmenovité napětí, uspořádání a způsob provozu uzlu napájecího transformátoru (nulového bodu soustavy). Toto principiální řešení elektrické sítě určuje její vlastnosti, možnosti použití a má vliv na chování sítě během spojení fáze se zemí a to především na velikost vzniklého poruchového proudu a velikost napětí mezi fázovým vodičem a zemí. Na základě posuzování velikosti proudu je zvolen způsob dimenzování a chránění v soustavě a na základě velikosti napětí lze vyhodnocovat nároky kladené na izolaci. [1]

### 2.1 Řešení zapojení DTS 22/0,4 kV

Napájecí vedení vn - v případě napájení DTS z hladiny 22 kV jde o třífázové vedení napájené z transformátorů vvn/vn, jejichž způsob uzemnění uzlu sekundáru určuje možnosti provozu soustavy. V bezporuchovém stavu při provozu symetrické sítě se způsob uzemnění prakticky nijak neprojevuje, avšak zásadní rozdíl vzniká v případě spojení jedné fáze se zemí. V sítích účinně uzemněných a uzemněných přes uzlový odpor, jde o jednofázový zkrat a poruchový proud dosahuje hodnot, které vylučují další provoz postižené soustavy. Z tohoto důvodu musí dojít v co nejkratším čase k odpojení postiženého vedení. U sítí neúčinně uzemněných a izolovaných se jedná v tomtéž případě o zemní spojení, při kterém vzniklý poruchový proud nedosahuje tak vysokých hodnot a není tedy nutné bezprostřední vypnutí postiženého vedení. Distribuční soustava vn 22 kV je v rámci ČR provozována převážně neúčinně uzemněná s napěťovou tolerancí dle normy  $\pm 10\%$ . Sítě izolované případně uzemněné přes velkou impedanci, jejichž neživé části bývají spojené se zemí uzemněním, jsou označovány jako IT.

Napájené vedení nn - jedná se o trojfázovou síť s uzemněným nulovým bodem, ve které jsou neživé části bezprostředně spojeny s uzemňovacím bodem sítě ochranným vodičem, čímž je zaručena ochrana před nebezpečným dotykovým napětím (podle ČSN 33 2000-4-41 se jedná o ochranu odpojením od zdroje). Je-li funkce nulového a ochranného vodiče v celé síti sloučena do jediného vodiče (PEN) jedná se o síť TN-C. Tímto způsobem jsou provozovány sítě téměř veškeré rozvody DS nn. V případě, že má trojfázová síť uzemněný nulový bod a jsou-li ochranný vodič (PE) a nulový vodič (N) vedeny odděleně, jde o síť TN-S. Varianta TN-C-S má v části sítě funkci středního a nulového vodiče sloučenou do jednoho vodiče.

Dle ČSN 33 0121:2000 má pro ČR normalizované napětí sítě nn o kmitočtu 50 Hz hodnotu 230 V mezi fází a středním vodičem, resp. 400 V mezi fázemi čtyřvodičové trojfázové sítě.

Současně platí, aby v místě předání dodávky elektrické energie odběrateli z DS byla hodnota napětí dodržena v toleranci  $\pm 10\%$  (207 V - 253 V). Provozu distribučních transformátorů, jejich parametrům a regulaci je věnována podrobněji kapitola 3.2 [2], [3]

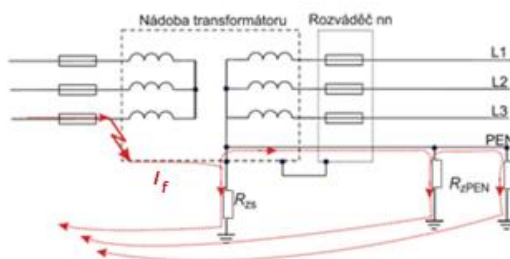
**Uzemnění DTS 22/0,4 kV** – určuje možnost vzniku poruch, jejich identifikace a bezpečnost v rámci stanice a sítě nn. Principiálně jsou dle normy ČSN 33 2000-4-42 [4] dva základní způsoby uzemnění a to oddělené nebo společné uzemnění DTS.

### 2.1.1 Spojená uzemnění

Při poruše zařízení vn protéká poruchový proud do země uzemněním v DTS a všemi uzemněními ochranného vodiče PEN. Podle normy [4] může být vodič PEN sítě nn připojen k uzemnění transformovny, pouze když dotykové napětí, které se objeví po dobu trvání poruchy v síti nn mezi neživými vodivými částmi a zemí  $U_{dot}$  je odpojeno v čase dle Obr. 2 - 3.

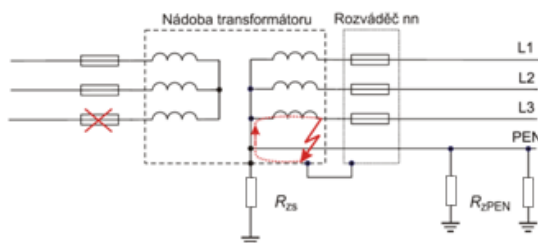
$$U_{dot} = R_E \cdot I_f = \frac{R_{ZS}R_{ZPEN}}{R_{ZS}+R_{ZPEN}} \cdot I_f \quad [\text{V}; \Omega, \text{A}] \quad (3.1)$$

kde  $R_E$  je celkový zemní odpor společného uzemnění a  $I_f$  je zbytkový proud zemní poruchy na straně vn, který protéká uzemňovací soustavou nebo omezený proud jednopólového zkratu u sítě s odporovým uzemněním uzlu.

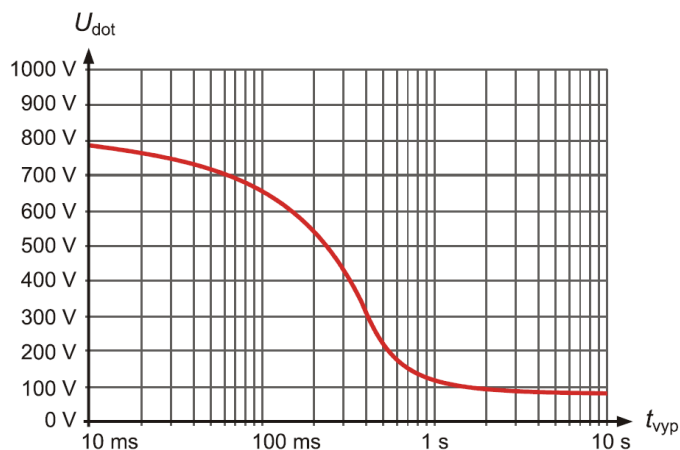


Obr. 2 - 1: Spojená uzemnění - porucha na straně vn [1]

Při poruše zařízení na straně nn, se stává spojení na kostru kovovým zkratem, který v DTS způsobí vypnutí pojistek na straně vn. Následně nedochází k žádnému průchodu proudu uzemněním a ani nikde nevznikají dotyková napětí. Spojení obou uzemnění je pro tuto poruchu výhodné. [1]



Obr. 2 - 2: Spojená uzemnění - porucha na straně nn [1]

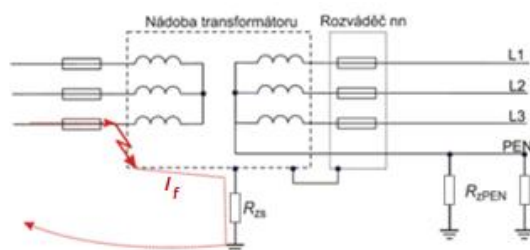


Obr. 2 - 3: Dovolené dotykové napětí v závislosti na době trvání poruchového proudu [1]

### 2.1.2 Rozdělená uzemnění

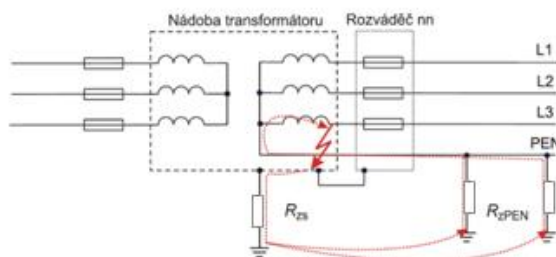
Jde o případ, ve kterém je PEN vodič uzemněn uzemněním elektricky nezávislým na uzemnění DTS. Při poruše zařízení vn (viz. Obr. 2 - 4) protéká místem poruchy stálý zbytkový proud (pro případ kompenzované vn sítě) a na ochranném uzemnění se objeví napětí [4]:

$$U_{ZS} = R_{ZS} \cdot I_f \quad [\text{V}; \Omega, \text{A}] \quad (3.2)$$



Obr. 2 - 4: Oddělená uzemnění – porucha na straně vn [1]

Vzhledem k faktu, že ochranný vodič PEN je oddělený od tohoto uzemnění, nepřenáší se na něj žádné napětí a síť nn není vystavena nebezpečnému dotykovému napětí. Napětí, které se objeví na uzemnění DTS, může nabývat vysokých hodnot. Značně nebezpečné je totiž objevení se plného napětí na kostře rozváděče nn proti střednímu vodiči. Uzemnění vodiče PEN se obvykle provádí až mimo DTS např. na nejbližším podpěrném bodu vývodu. [1]



Obr. 2 - 5: Oddělená uzemnění – porucha na straně nn [1]

Při poruše na zařízení nn, tj. vodivého spojení jednoho fázového vodiče se zemí, dochází k protékání poruchového proudu ochranným uzemněním DTS, na které je připojena nádoba

transformátoru a kostra rozváděče nn, a uzavírá se přes uzemnění nulového vodiče. Vzniklý proud je dán:

$$I_f = \frac{U_f}{R_{ZS} + R_{zPEN}} \quad [A; V, \Omega] \quad (3.3)$$

kde  $U_f$  je fázová hodnota napětí,  $R_{ZS}$  odporem uzemnění DTS  $R_{zPEN}$  odpor uzemnění PEN vodiče. Proud obvykle může protékat dlouhou dobu, protože není nijak měřen či signalizován a zpravidla je objeven náhodně při revizi. Na všech nulovaných částech sítě nn vzniká napětí, které se rozdělí v poměru impedancí. Napětí na uzemnění DTS bude tedy [1]

$$U_{ZS} = U_f \frac{R_{ZS}}{R_{ZS} + R_{zPEN}} \quad [V; V, \Omega] \quad (3.4)$$

## 2.2 Distribuční transformátory 22/0,4 kV

Jsou používány k přeměně vysokého napětí (22 kV) na napětí nízké (0,4 kV). Jmenovitými parametry jsou jmenovitý výkon, převod transformátoru s možnostmi nastavení odboček, ztráty nakrátko a naprázdno, napětí nakrátko, proud naprázdno, spojení a hodinový uzel transformátoru. Distribuční transformátory (DT) musí být vyrobeny, vyzkoušeny a provozovány dle ČSN EN 60076, ČSN 1031, ČSN 1086, ČSN 1101, ČSN 1121, ČSN EN 50464, ČSN EN 50541. Transformátory vn/nn mohou být provedeny jako olejové nebo suché, standardně se však používají třífázové olejové transformátory vn/0,4 kV a vn/0,42 kV v hermetizovaném prostředí, s měděným vinutím a redukovanými ztrátami naprázdno. Dle umístění transformátorů rozeznáváme stožárové a kioskové trafostanice. Hodnoty jmenovitého výkonu pro DT vn/nn jsou voleny dle doporučení normy (ČSN EN 60076-1) z řady čísel:

50, 100, 160, 250, 400, 630, 800, 1000, 1250, 1600 kVA

Standardně jsou v rámci ČR pro stožárové trafostanice instalovány transformátory do výkonu 400 kVA (pro příhradové 630 kVA). Pro kioskové DTS jsou obvykle instalovány DT do výkonu 630 kVA. [5], [6]

Tab. 2 - 1: Příklad parametrů vybraných transformátorů [7]

Jmenovitý výkon	kVA	50	100	160	250	400	630	800	1 000	1 250	1 600	Vyhotovení	Podle STN EN 60076, STN EN 50464
Typ	TOHn	268/22	298/22	318/22	338/22	358/22	378/22	388/22	398/22	408/22	418/22	Provedení	Hermeticky uzavřená vinová nádoba
Jmenovitě vyšší napětí	[V]	6 000; 10 000; 22 000										Chlazení	ONAN
Jmenovitě nižší napětí	[V]	400/231; 420/242										Chladicí kapalina	Minerální olej podle STN EN 60296
Skupina spojení		Yzn1	Yzn1	Yzn1	Yzn1	Dyn1	Dyn1	Dyn1	Dyn1	Dyn1	Dyn1	Materiál vinutí	Cu/Cu
Ztráty naprázdno $P_0$	[W]	190	320	460	650	930	1 200	1 400	1 700	2 100	2 600	Zatížení	Trvalé S1
Ztráty nakrátko $P_k$	[W]	1 350	2 150	3 100	4 200	6 000	8 700	10 500	13 000	16 000	20 000	Oteplení	Vinutí 65 K, oleje 60 K, okolí max. 40 °C
Napětí nakrátko $u_k$	[%]	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	Nadmořská výška	do 1 000 m
Akustický tlak $L_{pA}$	[dB(A)]	46	50	52	55	58	60	61	63	64	66	Frekvence	50 Hz
Akustický výkon $L_{WA}$	[dB(A)]	55	59	62	65	68	70	71	73	74	76	Třída izolace	A
												Odbočky na vinutí VN	±2x2,5 %
												Izolační hladiny	U <sub>1</sub> 22/0,4 kV, U <sub>2</sub> 25/1,1 kV, U <sub>3</sub> 150 kV, AC 50/3 kV
												Povrchová úprava	Standardní odstín RAL 7033
												Tolerance podle STN EN 60076-1	Ztráty $P_0$ +15 %, $P_k$ +15 %, $P_0 + P_k$ +10 % Napětí nakrátko: $u_k$ ±10 %

### 2.2.1 Převod a regulace DT 22/0,4 kV

Převod transformátoru je dán poměrem závitů vyšší (vstupní) napěťové strany a nižší (výstupní) strany, avšak je definován napěťovým údajem. Napětí na vstupní straně je uvažováno jako napětí z normalizované řady, kdežto hodnoty napětí na výstupní straně jsou vyšší, než uvádí normalizovaná řada.

Řízení napětí v distribuční soustavě je dle vyhlášky MPO ČR plně v kompetenci dispečinků provozovatele DS, avšak tak, aby napětí v předávacím místě mělo maximální odchylku  $\pm 10\%$ . Samotná regulace napětí v DS je prováděná ve dvou stupních a to regulací na hladině vn a nn, které jsou prováděny pomocí přepínání odboček na vyšší napěťové straně. Distribuční transformátory vvn/vn jsou obvykle realizovány jako  $110\pm 8 \times 2\%/23$  kV umožňující regulaci pod zatížením. V DS nízkého napětí je napětí nastaveno pomocí přepínání odbočky na vn straně transformátoru. Současně vyráběné transformátory mají převod  $22\pm 2 \times 2,5\%/0,4$  kV, resp.  $22\pm 2 \times 2,5\%/0,42$  kV, dříve vyráběné  $22\pm 5\%/0,4$  kV. Odbočky jsou nastavovány mechanicky v beznapěťovém stavu. [8]

Tab. 2 - 2 vyjadřuje jaký rozsah napětí transformátoru 22/0,4 kV lze pokrýt, je-li uvažována i regulace transformátoru vvn/vn (levý sloupec)

Tab. 2 - 2: Rozsah výstupních fázových napětí DT 22/0,4 kV [8]

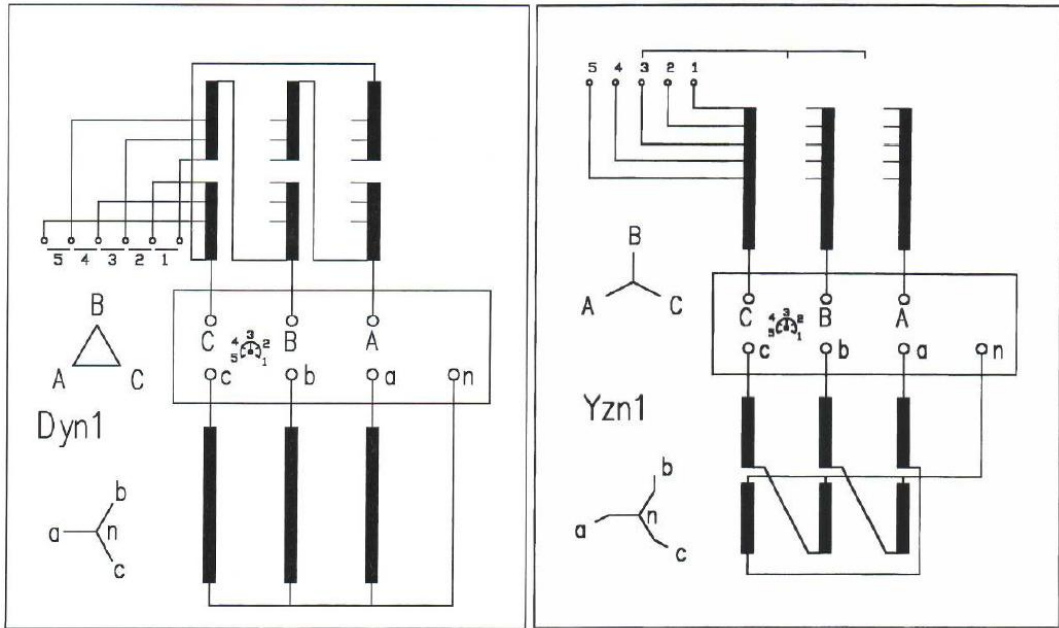
110/23 kV		22/0,4 kV - fázové					
odbočka	napětí	-5%	-2,50%	0	2,50%	5%	
-8	27,381	0,303	0,295	0,287	0,280	0,274	
-7	26,744	0,296	0,288	0,281	0,274	0,267	
-6	26,136	0,289	0,281	0,274	0,268	0,261	
-5	25,556	0,282	0,275	0,268	0,262	0,255	
-4	25,000	0,276	0,269	0,262	0,256	0,250	
-3	24,468	0,270	0,263	0,257	0,251	0,245	
-2	23,958	0,265	0,258	0,251	0,245	0,240	
-1	23,469	0,259	0,253	0,246	0,240	0,235	
0	23,000	0,254	0,248	0,241	0,236	0,230	
1	22,549	0,249	0,243	0,237	0,231	0,225	
2	22,115	0,244	0,238	0,232	0,226	0,221	
3	21,698	0,240	0,234	0,228	0,222	0,217	
4	21,296	0,235	0,229	0,224	0,218	0,213	
5	20,909	0,231	0,225	0,219	0,214	0,209	napětí s odchylkou do +6 %
6	20,536	0,227	0,221	0,216	0,210	0,205	napětí s odchylkou do -6 %
7	20,175	0,223	0,217	0,212	0,207	0,202	napětí s odchylkou do 10 %
8	19,828	0,219	0,213	0,208	0,203	0,198	napětí mimo odchylku

### 2.2.2 Zapojení vinutí DT 22/0,4 kV

Vinutí transformátorů vn/nn (viz. Tab. 2 - 2) mají u vyšších výkonů (od 250/400 kVA) vinutí vyššího napětí spojeno do trojúhelníku (D). Vinutí nižšího napětí je spojeno do hvězdy (y) a umožňuje při vyvedení uzlu použít jak fázové, tak i sdružené napětí. Výhodou je, že toto zapojení (Dyn1) dobře snáší nerovnoměrné zatížení.

Pro nižší hodnoty výkonů (50 kVA – 160/250 kVA) je používané spojení vinutí Yzn1, ve kterém je vinutí vyššího napětí zapojeno do hvězdy a vinutí nižšího napětí do lomené hvězdy.

U zapojení transformátorů je udáván i hodinový úhel, jenž vyjadřuje posun fázového napětí sekundární strany vůči fázovému napětí primární strany transformátoru. Úhel je uvažován ve směru hodinových ručiček a bývá vyjádřen celým číslem (násobkem úhlu  $30^\circ$ ), tj. úhlu jedné hodiny. [5]



Obr. 2 - 6: Schéma zapojení transformátorů vn/nn [9]

### 3 ANALYTICKÉ METODY PRO PORUCHOVÉ STAVY V DS

Samotné monitorování, detekce a následná analýza poruchových veličin vychází v trojfázovém systému z monitorování napětí a proudů jednotlivými fázemi a jejich následnou analýzou pomocí vhodného analytického algoritmu, který provádí řadu potřebných výpočtů a úprav pro zjednodušení analytické funkce. Mezi tyto funkce patří především harmonická analýza, fázorová analýza, RMS analýza, analýza pomocí souměrných složek, jimž u navzorkovaných signálů (viz. kap. 4.2.1) často předchází Fourierova transformace. Vybrané typy analýz jsou popsány níže.

#### 3.1 Obecná teorie

V následujících podkapitolách jsou pro lepší pochopení osvětleny základní principy výše zmíněných analýz.

##### 3.1.1 Fourierova transformace

Fourierova transformace je zřejmě nejvíce používanou analytickou metodou pro zpracování signálu. J. Fourier přišel na to, že spojitou periodickou funkci lze zobrazit pomocí nekonečného součtu komplexních exponenciál (resp. harmonických funkcí cosinus a sinus). Fourierovu transformaci lze tedy získat globální informaci o frekvenčním složení sledovaného spojitého signálu  $x(t)$ , viz. definice ve (3.1). Prakticky slouží pro transformaci signálu z časové oblasti do frekvenční oblasti. [13]

$$X_{FT}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2\pi ft} dt \quad (3.1)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X_{FT}(f)e^{j2\pi ft} df \quad (3.2)$$

Fourierovu transformaci a zpětnou rekonstrukci signálu (pomocí zpětné Fourierovy transformace (4.2)) lze provést, jsou-li splněny tzv. Dirichletovy podmínky: [12], [13]

- integrál  $\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt$  musí existovat, tj.  $X_{FT} \rightarrow 0$  a  $|f| \rightarrow \infty$
- časová funkce  $x(t)$  a jeho Fourierova transformace  $X_{FT}(f)$  jsou prosté, tj. žádné dvě hodnoty se nevyskytují ve stejný časový okamžik  $t$  nebo frekvenci  $f$
- časová funkce  $x(t)$  a jeho Fourierova transformace  $X_{FT}(f)$  jsou časově spojitě

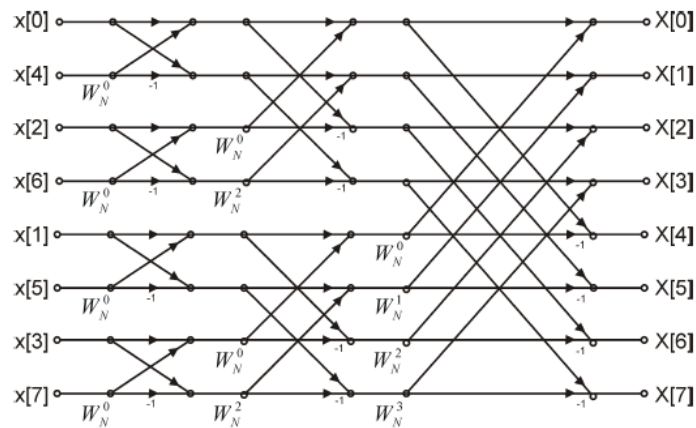
Většina sledovaných signálů nicméně není spojitých v čase, ale jsou navzorkované (podrobněji v kap. 4.2.1) jako diskrétní s časovým intervalem  $\Delta T$ , mají konečnou délku a jsou rozděleny do  $N$  konečného počtu intervalů. Počet vzorků se volí jako poměr délky periody základní harmonické a délky vzorkovací frekvence. Tento druh signálu může být analyzován ve frekvenční oblasti za pomoci diskrétní Fourierovy transformace (DFT) definované ve (3.3). Během vzorkování signálu se frekvenční spektrum stává periodickým, tudíž frekvence mohou být analyzovány jako konečné. [13], [14]

$$X_{DFT}(f) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j2\pi k \Delta T} dt \quad (3.3)$$

V roce 1965 byla představena tzv. rychlá Fourierova transformace (FFT), která disponuje zjednodušeným mechanismem výpočtu a je výpočetně značně jednodušší a efektivnější. Principem FFT je rozdělení vstupní  $N$ -bodové posloupnosti na dvě kratší posloupnosti (sudou a lichou) tak, že kombinací jejich DFT lze získat vstupní  $N$ -bodovou posloupnost. Prakticky tedy rozdíl spočívá v tom, že tento algoritmus nepracuje s libovolným  $N$  počtem intervalů, ale pouze s intervaly:

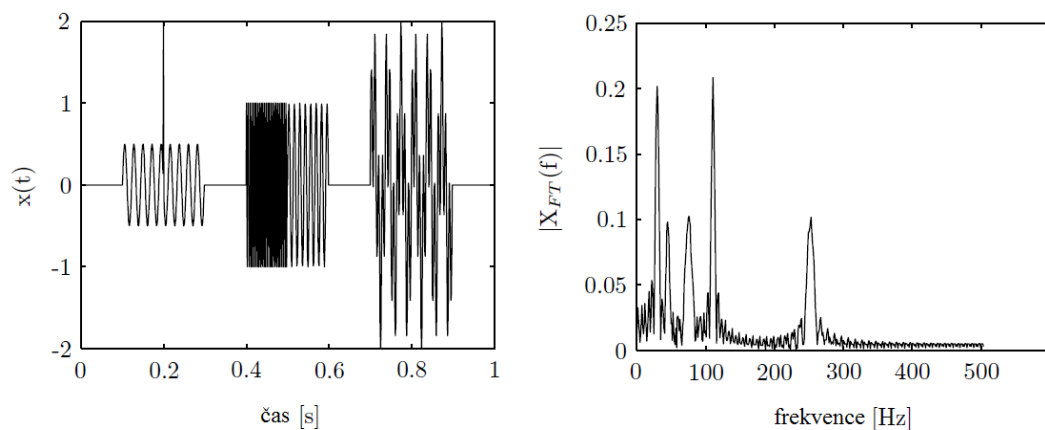
$$N = 2^m, \quad m \in \mathbb{N} \quad (3.4)$$

kde  $m$  vyjadřuje velikost vzorkovacího okna. Algoritmus výpočtu (Obr. 3 - 1) probíhá v několika částech, kde v každé části se provádí jednotlivý „motýlkový“ algoritmus. Do výpočetního algoritmu jsou přiváděny vzorky z časového okna, avšak v převráceném pořadí.



Obr. 3 - 1: Algoritmus FFT pro  $N=8$  [14]

V praktických výpočtech naráží FFT na dva problémy. Prvním je, že omezený počet hodnot diskrétního signálu může vést k aliasingu (viz. 5.2.1). Z Obr. 3 - 2 je také patrné, že jednotlivé harmonické složky nejsou v rámci spektra soustředěny do jednoho frekvenčního vzorku, ale jsou rozděleny do celého frekvenčního rozsahu. Tento jev je nazýván prosakováním ve spektru (leakage), tj. výkon jedné kmitočtové složky prosakuje do sousedních složek.



Obr. 3 - 2: Signál v časové oblasti  $x(t)$  a jeho FFT [13]

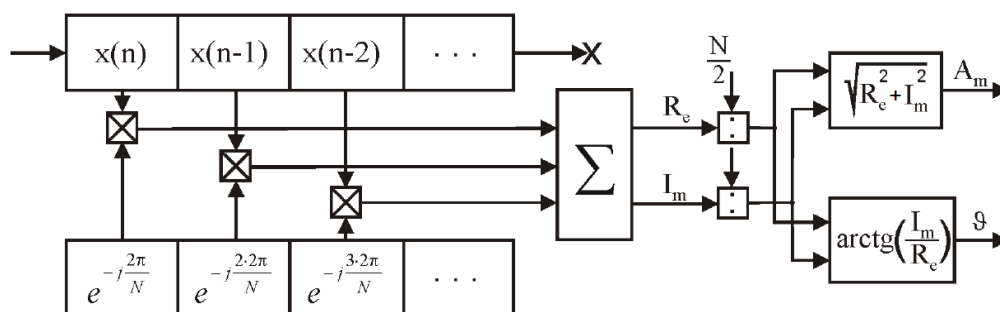
Preventivním opatřením je použití časových oken na sledovaný signál, čímž se signál stane více periodickým v časovém intervalu. Nevýhodou je, že toto okno samotné přispívá do frekvenčního spektra. V současnosti je používána celá řada oken, které se liší tvarem a spektrálními vlastnostmi. Mezi nejpoužívanější typy oken patří princip Hamming, Hanning, trojúhelníkové okno, Kaiser a další. [8]

Pro stacionární signály a pseudostacionární signály jsou schopny tyto Fourierovy transformace, jako analytické metody, podávat velmi dobrý popis signálu. Nicméně pokud je snaha zanalyzovat vysoce nestacionární signály, existují značné omezení a to zejména neschopnost se adaptovat na změny frekvence, což je dokázáno např. v [13].

### Estimace základní harmonické pomocí Fourierovy transformace

Ve své podstatě pro účely synchronizace záleží výběr estimační metody na základě Fourierovy transformace na tom, zda je dostupný dostatečný výpočetní výkon a je-li požadován výpočet celého spektra. Z tohoto úhlu pohledu plyne, že pro úsporu výpočetního výkonu a je-li požadován výpočet celého spektra, vychází značně příznivěji FFT. Použití FFT nicméně s sebou přináší díky dané velikosti vzorkovacího okna omezení volby velikosti vzorkovací frekvence. Podle [14] v případě, že postačuje pouze výpočet spektra pro základní harmonickou, dochází ke značnému snížení výpočetních nároků a je možné aplikovat i algoritmus DFT v reálném čase. Pro požadavek přesné znalosti informací o 1. harmonické, platí pro oba algoritmy, že v jejich vstupním bufferu musí být obsažen celistvý násobek jejich period. V případě, že tento požadavek není splněn, dochází k rozložení spektrální čáry na více spektrálních čar a zpětná rekonstrukce signálu není možná.

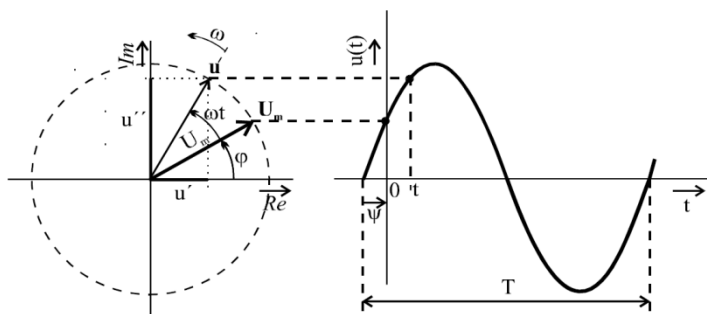
Principiální blokové schéma základního synchronizačního algoritmu (založeného na DFT) je uvedeno na Obr. 3 - 3, kde v rámci každé vzorkovací periody je aktuální vzorek vstupního signálu  $x(n)$  načten na první pozici do plovoucího vzorkovacího okna o velikosti  $N$ . V tento okamžik zároveň dochází k posunu ostatních vzorků a zapomenutí nejstaršího vzorku. Následně jsou veškeré vzorky ze vstupního bufferu komplexně vynásobeny koeficienty ( $\cos$  a  $j\sin$ ). V dalším kroku dochází k sumaci všech kosinových a sinových složek od všech vzorků, ze kterých je získána reálná a imaginární část základní harmonické vynásobené časem. Tyto hodnoty musí být děleny polovinou velikosti okna  $N/2$ , aby byla obdržena řádná velikost složek. Na závěr je proveden výpočet amplitudy a fázového posunu sledovaného signálu.



Obr. 3 - 3: Estimátor základní harmonické na principu DFT [14]

### 3.1.2 Fázory

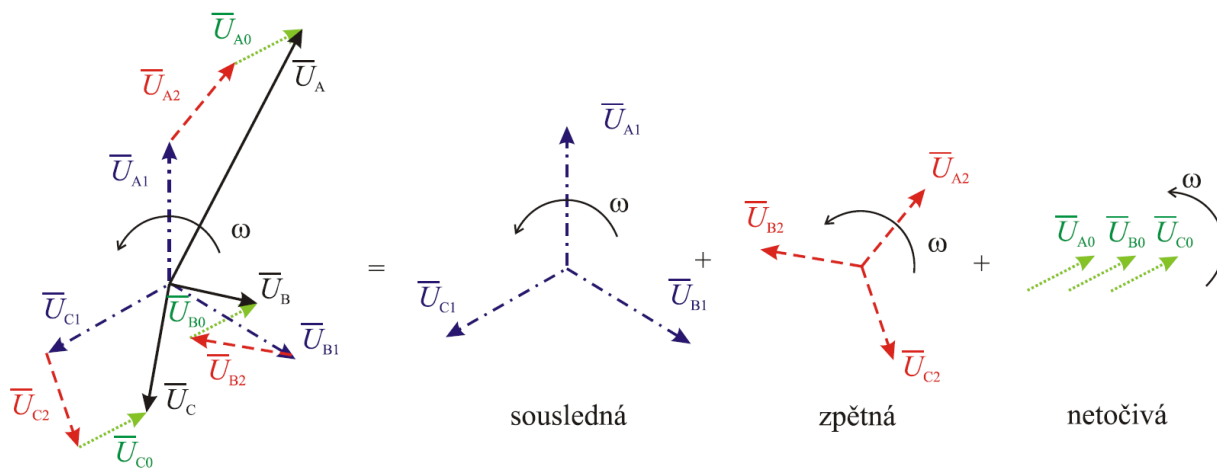
Fázor je definován jako rotující (nebo i časový) vektor, který může svým průmětem zastupovat okamžitou hodnotu skutečné harmonické proměnné veličiny, je nazýván komplexorem. Modul této komplexní veličiny je roven amplitudě veličiny (např. napětí  $U_m$ ) a argument je roven fázi ( $\omega t + \psi$ ). Reálná složka komplexoru (jeho průmět do reálné osy)  $u'$  a imaginární složka komplexoru (průmět do imaginární osy)  $u''$  lze zobrazit jako:



Obr. 3 - 4: Rotující fázor a harmonické napětí [10]

### 3.1.3 Teorie souměrných složek

Pro zjednodušení výpočtu poruchových veličin a stavů v trojfázovém systému je požívána transformace do tzv. složkových soustav. Tato transformace významně zjednodušuje analyzovaný obvod obsahující poruchu a poskytuje efektivní řešení symetrických i nesymetrických poruch. Matematicky lze chápat transformaci jako rozložení libovolně nesymetrických fázorů na soustavu symetrických fázorů viz. Obr. 3 - 5.



Obr. 3 - 5: Rozklad třífázového nesymetrického napětí do složkové soustavy [11]

Dle [12] lze přiřadit jednotlivým složkám fyzikální význam, resp. sousledná složka (1) má význam symetrického třífázového zdroje s dohodou stanoveným sledem fází (roztáčející motor v kladném směru), zpětná složka (2) má význam symetrického fázového zdroje s opačným sledem fází (motor je roztáčen v záporném směru) a netočivá složka (0) má význam jednofázového zdroje zapojeného do všech fází (motor neroztáčející). Za předpokladu lineárních vlastností prvků obvodu je možné následně provést zpětnou transformaci složkových veličin, a tím získat řešení pro fázové veličiny v trojfázovém systému.

Matematicky lze rozepsat fázové napětí, resp. proudy pomocí složkových veličin, odvození vychází z [11]:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{A1} + \bar{U}_{A2} + \bar{U}_{A0} \\ \bar{U}_B &= \bar{U}_{B1} + \bar{U}_{B2} + \bar{U}_{B0} \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_{B1} + \bar{U}_{B2} + \bar{U}_{B0}\end{aligned} \quad [\text{V}; \text{V}, \text{V}, \text{V}] \quad (3.5)$$

Je-li zvolena fáze A jako referenční, lze přepsat soustavu rovnic:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}^{(1)} + \bar{U}^{(2)} + \bar{U}^{(0)} \\ \bar{U}_B &= \bar{a}^2 \bar{U}^{(1)} + \bar{a} \bar{U}^{(2)} + \bar{U}^{(0)} \\ \bar{U}_C &= \bar{a} \bar{U}^{(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}^{(2)} + \bar{U}^{(0)}\end{aligned} \quad [\text{V}; \text{V}, \text{V}, \text{V}] \quad (3.6)$$

kde  $\bar{a}$  je tzv. operátor natočení a má hodnotu:

$$\bar{a} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + \frac{j\sqrt{3}}{2} \quad (3.7)$$

$$\bar{a}^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - \frac{j\sqrt{3}}{2} \quad (3.8)$$

potom lze zapsat transformaci maticově pro fázové a složkové napětí:

$$[\bar{U}_F] = \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix} \quad [\bar{U}_S] = \begin{bmatrix} \bar{U}^{(1)} \\ \bar{U}^{(2)} \\ \bar{U}^{(0)} \end{bmatrix} \quad [\text{V}; \text{V}, \text{V}, \text{V}] \quad (3.9)$$

tedy

$$[\bar{U}_F] = [\bar{F}] \cdot [\bar{U}_S] \quad [\text{V}; -, \text{V}] \quad (3.10)$$

kde

$$[\bar{F}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad [-; -] \quad (3.11)$$

protože je determinant matice  $\bar{F}$  nenulový, lze provést její inverzi a tím i přepočít fázových hodnot (napětí) na souměrné složky:

$$[\bar{U}_S] = [\bar{F}]^{-1} \cdot [\bar{U}_F] \quad [\text{V}; -, \text{V}] \quad (3.12)$$

resp.

$$\begin{aligned}\bar{U}^{(1)} &= \frac{1}{3}(\bar{U}_A + \bar{a}\bar{U}_B + \bar{a}^2\bar{U}_C) \\ \bar{U}^{(2)} &= \frac{1}{3}(\bar{U}_A + \bar{a}^2\bar{U}_B + \bar{a}\bar{U}_C) \quad [\text{V}; \text{V}, \text{V}, \text{V}] \\ \bar{U}^{(0)} &= \frac{1}{3}(\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C)\end{aligned}\quad (3.13)$$

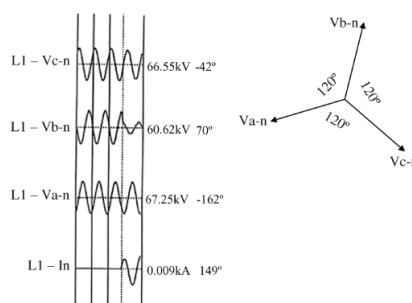
Analogicky platí pro proudy:

$$\begin{aligned}\bar{I}_A &= \bar{I}^{(1)} + \bar{I}^{(2)} + \bar{I}^{(0)} \\ \bar{I}_B &= \bar{a}^2\bar{I}^{(1)} + \bar{a}\bar{I}^{(2)} + \bar{I}^{(0)} \\ \bar{I}_C &= \bar{a}\bar{I}^{(1)} + \bar{a}^2\bar{I}^{(2)} + \bar{I}^{(0)}\end{aligned}\quad \begin{aligned}\bar{I}^{(1)} &= \frac{1}{3}(\bar{I}_A + \bar{a}\bar{I}_B + \bar{a}^2\bar{I}_C) \\ \bar{I}^{(2)} &= \frac{1}{3}(\bar{I}_A + \bar{a}^2\bar{I}_B + \bar{a}\bar{I}_C) \quad [\text{A}; \text{A}, \text{A}, \text{A}] \\ \bar{I}^{(0)} &= \frac{1}{3}(\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C)\end{aligned}\quad (3.14)$$

Tímto postupem určené souměrné složky fázorů mají totožnou frekvenci s frekvencí fázorů původní nesouměrné soustavy. Je nutné však podotknout, že tato frekvence původní soustavy je vybraná z celého frekvenčního spektra prostřednictvím vhodné metody (např. DFT, FFT viz. kap. 3.1.1) Transformaci lze aplikovat i na celý trojfázový obvod a provést jeho vyřešení, avšak je nutné znát náhradní schémata všech prvků ve všech složkových soustavách. V případě, že síť neobsahuje nesymetrické prvky, napětí a proudy jsou ve zpětném a netočivém schématu nulové. Pokud se v síti objeví nesymetrický prvek (zátěž, porucha) náhradní schéma nesymetrického prvku propojí schémata všech složek a začnou téct proudy i ve zpětném a případně i v netočivém schématu. [11],[12]

### 3.2 Fázorová analýza

Fázorová analýza je využívána pro posuzování vlastností trojfázového systému pomocí velikosti okamžitých hodnot napětí a proudů a jejich fázorů. Na základě vztahů mezi fázory a jejich změn lze analyzovat poruchové děje v ES. Obvykle bývá jedna fáze zvolena jako referenční a ostatní bývají přepočteny (resp. vyobrazeny) relativně vůči referenci. Pro zobrazení je výhodné použít polární tvar tj. s absolutní hodnotou a argumentem.



Obr. 3 - 6: Příklad fázorového diagramu pro stav sítě před poruchou [15]

### 3.3 Analýza použitím souměrných složek

Analýzou rozkladem do souměrných složek (kap. 3.1.2) lze získat hodnoty sousledných, zpětných a netočivých složek zaznamenávaných napětí a proudů. Rozklad do souměrných složek bývá uplatňovaný především během zkratů a zemních poruch v DS, protože navýšení hodnot těchto netočivých (avšak i zpětných složek) je jednoznačnou charakteristikou poruchy. Souměrné složky mohou být tedy použity k detekci poruchy, posouzení poruchy a vybavení spouště pro začátek zaznamenávání poruchového záznamu.

### 3.4 RMS analýza

Efektivní hodnota (RMS root-mean-square) veličiny (např. proudu), který má spojitý periodický průběh, je definována jako:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (i_k)^2} \quad [A; -, A] \quad (3.15)$$

kde  $I_{RMS}$  je efektivní hodnota proudu,  $N$  je počet vzorků za periodu a  $i_k$  jsou jednotlivé navzorkované hodnoty proudu.

Výpočet efektivní hodnoty bývá proveden v rámci celého měření pro veškeré zaznamenávané signály, které jsou odděleny dvěma kurzory s pevnou hodnotou rozestupu (obvykle s délkou jedné periody nebo délkou časového okna). Algoritmus výpočtu spočívá ve vypočtení efektivní hodnoty z navzorkovaných dat z oblastí mezi dvěma kurzory. Algoritmus bývá obvykle založen na fázorově-estimační metodě, nejčastěji je používána diskretní Fourierova transformace s délkou okna odpovídající jedné periodě 50Hz signálu. [15]

### 3.5 Harmonická analýza

Zaznamenané hodnoty prostřednictvím poruchového záznamníku mohou být použity také pro vyhodnocení obsahu vyšších harmonických a kvality elektrické energie prostřednictvím výpočtu harmonického zkreslení a celkového harmonického zkreslení (*THD*) průběhů napětí a proudu. PZ může provádět harmonickou analýzu ze zaznamenaných napětí a proudů a tak poskytovat informace pro měření trendů, porovnávání zkreslení v různých místech ES. V závislosti na dostupném výpočetním výkonu a vstupní filtraci bývají vypočteny hodnoty od stejnosměrných až po 40. harmonickou proudů a napětí. Obvyklý algoritmus výpočtů je založený na Fourierové transformaci. [15]

Celkový činitel harmonického zkreslení napájecího napětí musí být menší nebo roven 8 % a je dle [1] definován jako:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} u_h} \cdot 100 \quad [%; -] \quad (3.16)$$

kde  $h$  je řád harmonické a  $u_h$  je relativní amplituda  $h$ -té harmonické vztažená k základní.

### 3.6 Analýza dotkových napětí

Na neživých částech zařízení DS se během poruchy mohou objevit nebezpečné hodnoty dotkového napětí (kap. 2.1) a proto vyvstává požadavek pro analýzu přítomnosti a hodnoty tohoto napětí. Klíčovými hodnotami určující velikost nebezpečného dotkového napětí je zejména hodnota poruchového proudu a hodnota odporu zemnicí soustavy, přes kterou se uzavírá poruchový proud. Průchodem poruchového proudu zemnicí soustavou DTS, která může být spojena se zemnicí soustavou sítě nn, dochází k výskytu rozdílu potenciálů mezi zasaženou zemnicí soustavou a „nulovým“ potenciálem země. Rozdíl těchto potenciálů je představován napětím potenciálu zemnicí soustavy, které je zdrojovým napětím pro nebezpečné dotkové (či krokové) napětí.

Dle podnikové normy pro provozovatele DS PNE 33 0000-1 [16] čl. 6.3.5.5 je stanoven postup pro měření dotkových napětí DTS vn/nn měřením rozdílů potenciálů. Postup výpočtu vychází ze změřené hodnoty zemního odporu  $R_0$ , který je úměrný potenciálu  $V_0$  měřeného uzemnění proti vzdálenému bodu s nulovým potenciálem a proudu  $I$  měřicího přístroje.

$$R_0 = \frac{V_0}{I} \text{ [}\Omega\text{; V, A]} \quad (3.17)$$

V definované vzdálenosti od uzemnění konstrukce je do země zaražena zemní elektroda. Pomocí tohoto zapojení lze změřit hodnotu odporu  $R_1$  odpovídající rozdílu potenciálů  $V_0 - V_1$  resp. dotkovému napětí  $U_{dot}$ .

$$R_1 = \frac{V_0 - V_1}{I} \text{ [}\Omega\text{; V, V, A]} \quad (3.18)$$

a následně

$$U_{dot} = V_0 - V_1 \text{ [V; V, V]} \quad (3.19)$$

V případě, že je známá (nebo změřená) hodnota omezeného zkratového proudu strany vn (resp. zkratový proud strany nn) lze vypočítat skutečné dotkové napětí následujícím postupem [16]:

$$U_{dot} = V_0 \cdot \frac{R_1}{R_0} \text{ [V; V, } \Omega, \Omega \text{]} \quad (3.20)$$

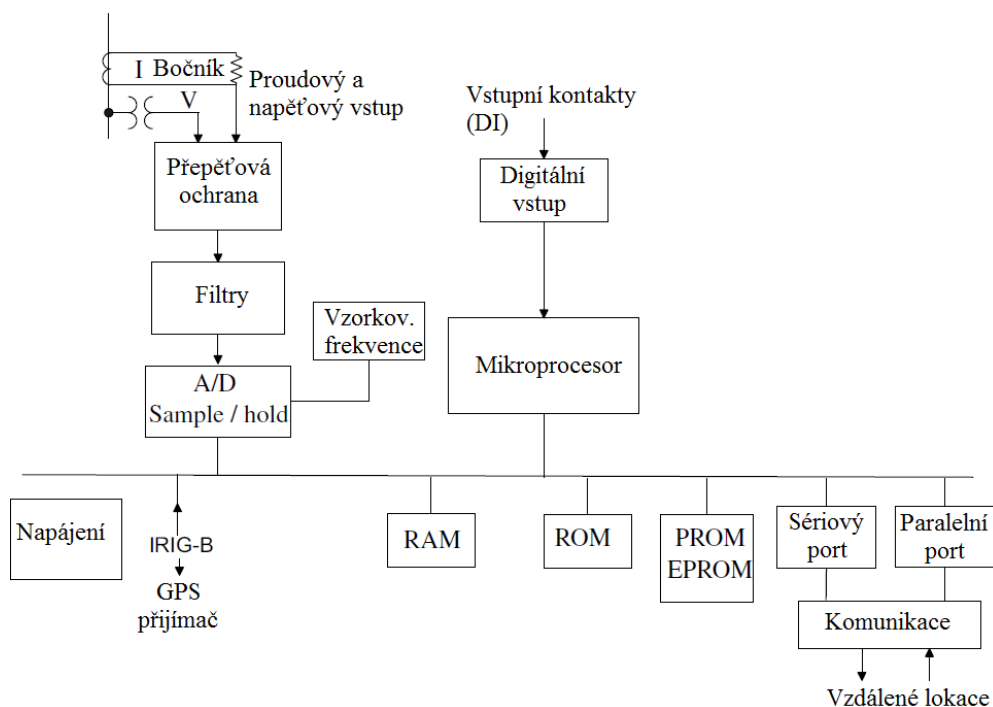
## 4 NÁLEŽITOSTI PORUCHOVÉHO ZÁZNAMNÍKU

Zařízení pro monitorování stavu sítě a záznam poruch jsou neocenitelnou součástí elektrizační soustavy, díky kterým je provozovatel schopen identifikovat poruchový stav systému a jeho jednotlivých součástí. Záznamem a analýzou průběhů poruchových veličin, resp. chování systému během poruchy lze získat dostatek informací pro vytvoření potřebných inovací a změn v distribuční síti. Aby měl vytvořený záznam dostatečně vypovídající hodnotu, musí splnit poruchový záznamník řadu požadavků. V závislosti na konceptu provedení poruchového záznamníku a jeho aplikaci musí být vyřešeny následující řada náležitostí, z nichž některé budou podrobněji rozebrány v následujících podkapitolách [18] :

- Dostupné zdroje dat a charakteristika snímacího příslušenství
- Vhodné zpracování dat pro zachycení požadované události
- Specifikace události pro záznam
- Aplikace spouště (trigger) potřebné k zachycení požadované události
- Vhodná metoda záznamu dat na datové úložiště

### 4.1 Popis současně používaných průmyslových systémů PZ

Většina v praxi aplikovaných poruchových záznamníků má provedení kompaktních jednotek, které jsou umístěné ve sledovaném bodě soustavy a propojené pomocí komunikačních kanálů s dalšími řídicími systémy elektrizační soustavy. Blokové schéma jednotlivých podsystémů obecně komerčně používaného PZ je níže uvedeno na *Obr. 4 – 1*.



*Obr. 4 - 1: Podsystémy digitálního poruchového záznamníku [15]*

Snímaný analogový signál je přiveden na přepětěovou ochranu a vzorkovací filtry. Vstupní proud protéká přes bočník, následně je přeměněn na napětí, které je vzorkováno a pomocí analogovo-digitálního (A/D) převodníku je přeměněno na digitální signál, který je přečten

a zpracován mikroprocesorem. Obdobně je hodnota vstupního napětí snížena na úroveň, která může být zpracována A/D převodníkem a mikroprocesorem. Postup filtrace, vzorkování a následného zpracování signálu je podrobněji rozebrán v kapitole 4.2 Zpracování dat. Digitální vstup představují funkční stavy v rámci sledovaného systému (např. vypínače, ochrany v rámci rozvodny). Základní koncept funkce PZ je provedení vzorkování a zaznamenávání dat do paměti zařízení podle předepsaných instrukcí, kdykoliv je splněna/překročena spouštěcí podmínka. Paměť RAM je používána pro dočasné ukládání dat, ROM a PROM jsou používány pro algoritmus záznamu a softwarovou analýzu vzorků. Paměť EPROM je vyhrazená pro uložení spouště a nastavených parametrů. Programovatelný digitální mikroprocesor je využíván pro zpracování signálů, konverzi dat pro komunikační kanál, programovatelnost spouště, její zpoždění a další. Průmyslově používané PZ využívají časové synchronizace prostřednictvím IRIG-B signálu z GPS přijímače. Obvykle příslušenství PZ zahrnuje schopnost dálkového hledání poruch, okamžitou analýzu poruch a tím snižují čas a náklady spojené s provedením analýzy. [15],[18]

## 4.2 Zpracování dat

Číslicové zpracování signálu neboli digitalizace signálu je pojmem vyjadřující proces, pomocí kterého je vstupní spojitý analogový průběh veličiny převeden na digitální. Digitální průběh se od spojitého liší ve dvou zásadních skutečnostech a to, že má diskretizovaný definiční obor (tj. je navzorkovaný) a diskretizovaný obor hodnot (tj. je kvantifikován). Tyto dvě omezení určují, kolik informací může digitální signál obsahovat. Prakticky je na vstupní signál aplikovaná filtrace, analogová či digitální, která spolu se vzorkovací frekvencí určuje frekvenční odezvu sledovaných informací. Tradičním postupem je následně zpracování pomocí časových „oken“ a vhodného algoritmu, který má následně značný dopad informační hodnotu zpracovávaných dat.

### 4.2.1 Vzorkování

Vzorkování je definováno jako rozložení definičního oboru na konečný počet podmnožin, resp. konverze nezávislé spojitě veličiny na diskrétní. Prakticky je realizováno pomocí vzorkovacího obvodu, kdy s přesně definovanou periodou  $T_s$  je odebírán vzorek signálu, který se zaznamenává. Změny hodnot sledované veličiny mezi těmito intervaly odběru (měřeními) jsou ignorovány, čímž se nenávratně ztrácí část informace obsažené v původním signálu. Kvalita digitalizace je tedy přímo úměrná vzorkovací frekvenci, tudíž s vyšší vzorkovací frekvencí je dosažena vyšší kvalita a rozlišení záznamu.

Pro správnou rekonstrukci původního signálu ze signálu vzorkovaného je nutné zvolit správnou vzorkovací frekvenci, kterou definuje tzv. vzorkovací teorém, nazývaný také Nyquistův-Shannonův teorém. Vzorkovací teorém stanovuje, že pro dosažení správného vzorkování spojitě signálu, musí mít vzorkovací frekvence ( $f_s$ ) alespoň dvakrát vyšší než je maximální frekvence rekonstruovaného signálu, resp. maximální šířka oboustranného spektra.

$$f_s \geq 2f_{max} \text{ [Hz; Hz]} \quad (4.1)$$

Aby při procesu periodizace spektra byl splněn vzorkovací teorém a nedocházelo k jeho překrývání (aliasing), a tím také k jeho nenávratnému znehodnocení spektra je nutné zajistit

maximální frekvenci  $f_{max}$ . Tento požadavek je realizován pomocí omezujícího (antialias) filtru. Více informací o aplikaci filtrů je uvedeno v podkapitole 4.2.2 Filtrace. [19]

V praxi instalované digitální poruchové záznamníky používají vzorkovací poměr 64-128 vzorků/periodu (tj. při 50 Hz je vzorkovací frekvence 3,2-6,4 kHz), některé zařízení využívají až 384 vzorků/periodu (kdežto digitální ochrany využívají pouze 4-32 vz./p.). Vzorkovací poměr a vzorkovací frekvence nemusí být pevně nastaveny, nicméně většina digitálních poruchových záznamníků (DFR) používá konstantní časový interval mezi vzorky, nezávisle na aktuální frekvenci systému. [18]

Tab. 4 - 1: Typicky používané vzorkovací poměry a frekvenčně harmonický rozsah [18]

Počet vzorků/periodu (-)	Vzorkovací frekvence (Hz)	Nejvyšší zjistitelná harmonická (-)
32	1600	8
64	3200	16
96	4800	24
128	6400	32
256	12800	64
384	19200	96

#### 4.2.2 Filtrace

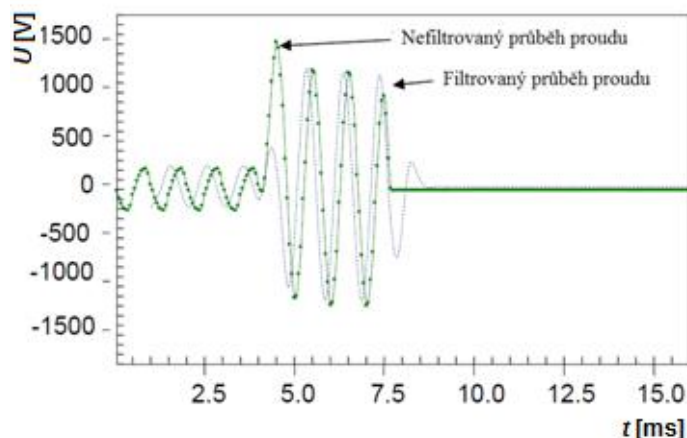
Veškeré digitální zařízení včetně digitální ochrany a DFR musí mít anti-aliasing schopnost, který bývá obvykle provedena jako analogový nebo digitální filtr.

Analogové filtry – bývají obvykle provedeny jako filtr, typu dolní propust', zařazený před vzorkovací obvod, který odstraní všechny frekvence nad maximální hodnotou frekvence sledovaného signálu. Jinak by docházelo k překrývání se spodní části spektra, z důvodu konečného počtu vzorků. Hraniční „cut-off“ frekvence analogového filtru musí být stanovena podle Nyquist-Shannonovém teorému. DFR obvykle mají nastaveny cut-off frekvenci přibližně kolem 1 kHz. [18]

Digitální filtry – poskytují data s vysokou úrovní reprezentace vstupního střídavého signálu a jejich přesnost odpovídá provedení filtru aplikovaného na střídavý signál na vstupu. Primárním účelem digitálního filtru je potlačení nechtěných složek sledovaného signálu, zvláště stejnosměrné složky. [19]

Zaznamenaná data s použitím digitálních filtrů mohou poskytovat velice dobrou vypovídající hodnotu, avšak je nutné počítat s principem filtru a s tím spojenými omezeními v prezentaci dat. Mezi tyto omezení patří nízký vzorkovací poměr (platí pro data zaznamenaná digitálními ochranami), omezená frekvenční odezva na vyšší frekvence, stejnosměrné filtrování a softwarové filtrování. Také je nutné poznamenat, že digitálně filtrovaná data se zpožďují za vzorkovanými daty (což je důsledkem filtru), viz. Obr. 4 – 2, kde není zobrazen vliv stejnosměrné složky a filtrované hodnoty neodpovídají skutečnému průběhu (např. zkrácená amplituda napětí). Proto digitální filtrace bývá prakticky aplikována spíše pro akční členy systému (např. digitální ochrany), které na základě estimační metody (Fourierová transformace) získají vstupních veličin pro jejich další zpracování případně vyvození reakce např. vybavení. Nicméně pro poruchový

záznamník mohou být hodnoty značně zkreslené. Z tohoto důvodu poruchové záznamníky zaznamenávají veškeré navzorkované data ihned po převodu na digitální. [17], [18]



Obr. 4 - 2: Zkreslení digitální filtrace [18]

### 4.2.3 Časové okna

Zpracování zaznamenaných informací obvykle vyžaduje analýzu v rámci určitého časového intervalu resp. „okna“, které může mít délku řádově  $\mu\text{s}$  až hodin. Každé toto okno je v rámci analýzy zpracováno osobitně a je následně využito jako proměnná aplikace.

Tab. 4 - 2: Časové okna [17]

Časový interval	Událost	Aplikace
Mikrosekundy	Spínací pochody	Zapnutí vypínače
Milisekundy	Harmonické změny	Frekvenčně řízené stroje
Periody	Poruchy	Ochrany, PZ
Sekundy	Změny zátěže	Odezva budiče
Minuty	Stabilita systému	Změny toku výkonu
Hodiny	Změna zátěže	Plánování výroby

V závislosti na délce časového okna je z důvodu nepřesnosti doporučeno ignorovat určitý počet prvních navzorkovaných (minimálně 2) tzv. ramp-up hodnoty v prvním časovém okně a poslední navzorkované hodnoty (ramp-down) v posledním okně. Proto je značně výhodnější používat vyšší vzorkovací poměr, čímž se značně sníží doba trvání těchto ramp hodnot. [17]

## 4.3 Monitorové veličiny

Pro získání dostatečných informací pro identifikaci výskytu poruchy a případnou reakci, je nutné zvážit volbu měřicích kanálů PZ. Z tohoto důvodu vzniká v třífázových soustavách požadavek na monitorování třech fázových napětí a třech fázových proudů. Pro transformátory se zapojením do hvězdy s vyvedeným nulovým vodičem, může být požadováno monitorovat nebo dopočítat proud tekoucí nulovým vodičem, díky kterému je PZ schopen rozpoznat nesymetrii v systému, která může být způsobena zemní poruchou nebo selháním zátěže v jedné fázi. Pro každý analogový vstup mohou být také naprogramovány algoritmy pro sledování hodnot

nad a pod danou mezí (podpětí, přepětí...) nebo změnu hodnot. Typicky monitorované hodnoty PZ na úrovni rozvodny dle [15] jsou uvedeny níže v seznamu:

- Fázové napětí
- Proud tekoucí fázemi (vyšší a nižší strany) transformátoru a nulovým vodičem do uzlu
- Proud tekoucí terciárním vinutím transformátoru
- Sousedné, zpětné a netočivé složky proudů a napětí
- Kolísání frekvence
- Změna impedance
- Celkové harmonické zkreslení (*THD*)
- Napětí přípojnic
- Vybíjející proudy
- Dotykové napětí
- Proudů pro kompenzaci jalového výkonu

#### 4.4 Metody detekce poruchových stavů a aplikace spouště

Vybavení spouště (trigger) PZ a počátek zaznamenávání je prováděno na základě detekce definovaného poruchového stavu v distribuční síti. Tento popud vychází z analytických metod a bývá podmíněn změnami změřených hodnot, vypočtených hodnot, logických stavů nebo změnou externích vstupů. Pro dosažení vhodné selektivity mohou tuto spoušť vybavit jednotlivé sledované veličiny nebo jejich kombinace, které přesáhnou nastavenou prahovou hodnotu. Také obvykle bývají aplikované časové zpoždění pro ověření pravosti poruchového stavu.

Jako metody detekce poruchového stavu a podněty pro „zatriggerování“ jsou obvykle sledovány:

Sledování amplitud – nejčastěji je sledována amplituda fázového napětí a proudu tekoucího fází. Při poklesu hodnoty fázového napětí resp. nárůstu amplitudy proudu ve fázi jde obvykle o jednofázovou poruchu. Dalšími významnými sledovanými hodnotami jsou netočivé složky napětí, u kterých při zemním spojení dochází ke zvýšení netočivé složky napětí. Proto je jak fázové napětí, tak i netočivá složka napětí používána pro detekci zemních poruch. Problémem je, že pro poruchy s vysokou impedancí může být změna napětí velmi malá, proto se někdy doporučuje sledovat přírůstek netočivé složky napětí. Sledování amplitudy netočivé složky napětí je používáno jako popudová veličina a při hodnotě (4.2) lze hovořit o vzniku zemního spojení. [17]

$$U^{(0)} \geq 0,3 \cdot U_f \quad (4.2)$$

Další obvykle sledovanou hodnotou je amplituda netočivých složek proudu – tato metoda vyhodnocuje amplitudu nulové složky proudu a zemní spojení nastalo v případě, že je vlivem poruchy překročena definovaná hodnota. [15]

Tyto triggerovací metody jsou obvykle provozovány bez jakéhokoliv časového zpoždění, protože okamžitá změna těchto veličin může znamenat možnou poruchu.

Poměrná změna veličin (rate-of-change) – tato metoda dává pokyn k zatriggerování v případě, že hodnoty změřených veličin stoupají (pozitivní změna) nebo klesají (negativní změna) s určitou strmostí za daný časový interval. Funkce buďto nepřetržitě vypočítává derivaci ze změřeného průběhu nebo jsou porovnávány hodnoty na začátku a na konci definovaného

časového intervalu. Tato metoda je typicky aplikovaná na nárůst nebo pokles frekvence v síti. [18]

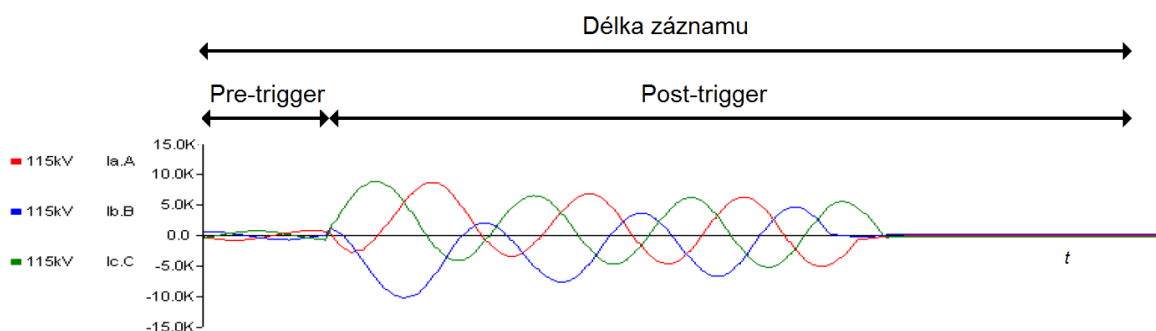
Sledování harmonických složek – principem metody je sledování obsahu vyšších harmonických složek, které jsou generovány vlivem zemního spojení a nelineárních zařízení. Tyto harmonické nejsou nijak kompenzovány, proto je lze spolehlivě vhodnou analytickou metodou určit. K zatriggrování dochází tedy v případě, jestliže obsah vyšších harmonických složek v měřeném nebo vypočteném vzorku hodnot překročí prahovou hodnotu během časového úseku. Tento trigger může být nastaven pro specifickou harmonickou (často používaná např. metoda páté harmonické) nebo vyšší harmonické. Další možností je výpočet celkového činitele harmonického zkreslení nebo činitele zkreslení pro specifickou frekvenci. [1],[15],[17]

Sledování poklesu a zvlnění napětí – tato metoda vychází ze sledování amplitud napěťového kanálu a je používána pro vyhodnocení kvality elektrické energie. Pokyn k záznamu je vydán při poklesu nebo nárůstu napětí nad danou hodnotu a to okamžitě, aby byly zachyceny krátké změny průběhu napětí.

#### 4.5 Metody zaznamenávání průběhů poruch

Pro přínosné vyhodnocení záznamu poruchového jevu je nutné, aby záznam obsahoval průběh sledovaných veličin i před počátkem vzniku poruchy. Toto zaznamenání průběhů síťových napětí a proudů před poruchou (tzv. pre-trigger) je kritické během analýzy události a případná ztráta dat může zpozdit včasnou detekci poruchy. Proto je také dle [17] doporučováno využít maximální dostupné kapacity měřicího zařízení pro detailní zaznamenání stavu sítě před poruchou.

Jakmile trigger vyhodnotí poruchový stav je vydán pokyn k záznamu sledovaných průběhů (post-trigger). Po dosažení požadované délky záznamu nebo je-li rozeznáno odeznění poruchového jevu, je vydán povel k ukončení záznamu.



Obr. 4 - 3: Oscilografický záznam proudů během poruchové události [17]

Celková délka záznamu je tedy dána množstvím zaznamenaných dat před poruchou a zaznamenanými daty po detekci poruchy. Délka záznamu před poruchou a po její detekci bývá dána nastavením dle potřeby, avšak v praxi používané PZ zaznamenávají data o délce trvání 1 s (50 period 50 Hz průběhu) pro pre-trigger a až 30s pro post-trigger při vysokých vzorkovacích

frekvencích (až 19,2 kHz). Maximální délka záznamu může být přednastavená nebo automatický v závislosti na dostupné kapacitě úložiště. [17],[18]

Pro uchovávání dat poruchovým záznamníkem existuje celá řada metod závisející především na provedení záznamníku a typu paměťového média. Typ paměťového média je volen v závislosti na koncepci PZ, jeho napájení a kapacita paměti určuje především možné množství zaznamenávaných dat.

Prakticky jsou používány dvě metody zápisu dat do paměti. První metoda používá typ zápisu, u kterého v případě zaplnění paměti dojde k přepisování nejstarších záznamů. Druhá metoda spočívá v ukončení zaznamenávání v případě zaplnění paměti. Z omezené kapacity paměťového média vyplývá tedy požadavek na signalizaci nedostatečné kapacity paměti. [18]

V návaznosti na předcházející kapitoly je nutné pro zaznamenávání dat PZ konfigurovat následující nastavení a vybrané nastavení je vhodné uložit do souboru se záznamem.

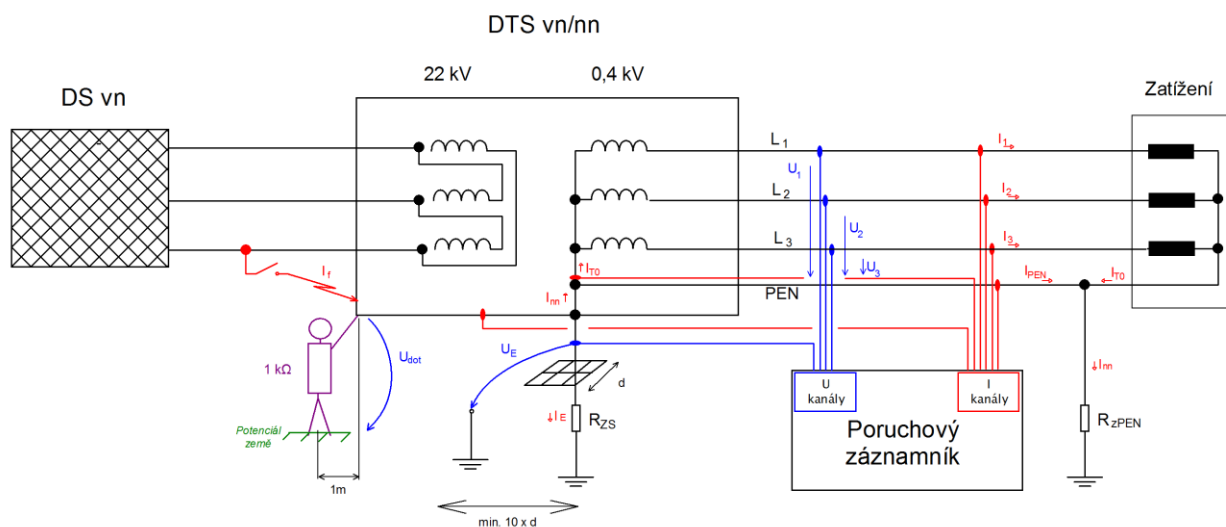
- Triggerovací podmínky – nastavitelné dle účelu PZ a potřeb uživatele
- Rychlost záznamu – nastavitelné dle účelu PZ a potřeb uživatele. Je určena především rychlostí vzorkování a výpočetním výkonem PZ. Změna této rychlosti tedy může značně ovlivnit výkon A/D převodníku, frekvenční odezvu filtrů, ale také rychlost provádění analýzy a záznamu.
- Záznam veličin – volitelný obsah záznamu obvykle zahrnuje veškeré měřené a vypočtené hodnoty v reálném čase, obvykle jde o velikosti amplitud a fází jednotlivých napětí, proudů, souměrných složek atd.
- Délka záznamu v rámci pre- a post-triggeringu.
- Délka trvání záznamu
- Čas vzniku poruchy

## 5 NÁVRH ŘEŠENÍ PORUCHOVÉHO ZÁZNAMNÍKU

Jak již bylo zmíněno, hlavním účelem navrhovaného poruchového záznamníku je sběr a vyhodnocování hodnot průběhů sledovaných veličin v reálném čase tak, aby v případě detekování poruchy bylo zajištěno spuštění záznamu těchto průběhů v co nejkratší době. V následujících kapitolách je proveden výběr vstupů a návrh uspořádání a algoritmu funkce PZ.

### 5.1 Vstupy pro poruchový záznamník

Ze zadání práce vyplývá, že tento PZ má primárně sledovat a zaznamenávat hodnoty průběhů napětí a proudů na sekundární straně DTS vn/nn. Z tohoto důvodu je pro monitorování těchto průběhů potřebné přiřadit každému fázovému vodiči jeden napěťový a jeden proudový měřící kanál. Hodnoty fázových napětí jsou měřeny vůči PEN vodiči. Jak bylo uvedeno v kap. 4.3, je u DT se zapojením sekundárního vinutí do hvězdy a vyvedeným nulovým vodičem vhodné monitorovat i proud tekoucí do uzlu transformátoru ( $I_{T0}$ ). Na základě znalosti hodnoty tohoto proudu lze v bezporuchovém stavu přibližně vypočítat hodnotu odporu zemnicí soustavy, proto je „před uzlem“ DT vložen další proudový kanál měřící tento proud. V případě poruchy, která je naznačena na *Obr. 5 - 1*, je nutné monitorovat i hodnotu poruchového proudu  $I_f$ , pro jehož měření bude vyhrazen další proudový kanál. V případě zemních spojení dochází k průchodu proudu  $I_E$  uzavírajícího se přes zemnicí soustavu a také k navýšení potenciálu zemnicí soustavy  $U_E$ , který je zdrojovým napětím pro nebezpečné dotykové a krokové napětí (viz. 3.6 Analýza dotykových napětí). Pro co nejpřesnější získání hodnoty zmiňovaného zemního proudu ( $I_E$ ) bude PEN vodiči přiřazen další proudový kanál měřící  $I_{PEN}$ . Následně na základě Kirchhoffových zákonů lze vypočítat přibližnou hodnotu  $I_E$ . Pro monitorování navýšení potenciálu je vyhrazen čtvrtý napěťový kanál, který měří napětí na PEN vodiči vůči vzdálené elektrodě, která má představovat „nulový“ potenciál země. Zemní elektroda pro toto měření se umísťuje do vzdálenosti odpovídající min. desetinásobku průměru zemnicí soustavy DTS. Poslední napěťový je přiřazen ke sledování dotykového napětí v rozvodně. Pro návrh PZ jsou tedy dále uvažovány výše uvedené kanály (tj. pět napěťových a šest proudových kanálů), které mohou být zapojeny dle účelu měření. [21]

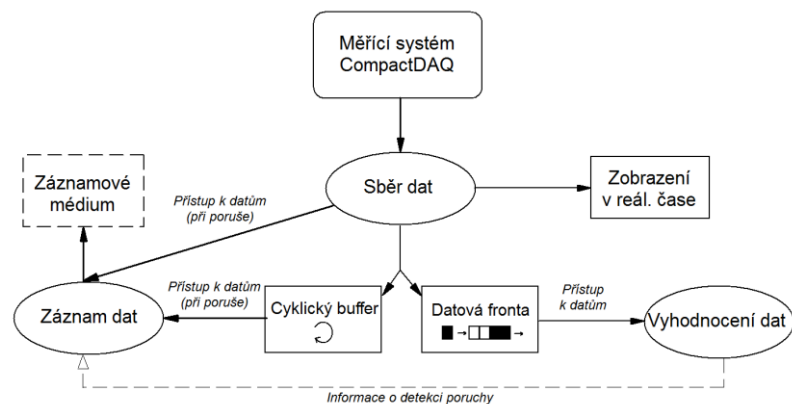


Obr. 5 - 1: Zjednodušené schéma měřících vstupů PZ

## 5.2 Návrh uspořádání a funkce systému PZ

Zdrojem dat pro celý proces budou CompactDAQ měřící karty (viz. kapitola 6), které s pevně danou, avšak nastavitelnou, vzorkovací frekvencí převádějí měřené hodnoty reálných proudů a napětí na hodnoty digitální. Tyto digitální hodnoty budou následně přivedeny do příslušného NI CompactDAQ šasi, které prostřednictvím USB předává data z hardwarové měřící platformy softwarovému zpracování dat v prostředí Labview, které bude dále principiálně nastíněno.

Vzhledem k tomu, že algoritmus funkce PZ vychází z dostupných hardware-softwarových prostředků, jsou jednotlivé funkce rozděleny do jednotlivých na sobě závislých celků (podsystemů), které obstarávají sběr dat, jejich vyhodnocování a záznam. V prostředí LabVIEW tyto jednotlivé podsystemy představují navzájem propojené smyčky (tzv. loops) a variační struktury (case structure). Navržený tok dat mezi jednotlivými podsystemy zobrazuje Obr. 6-2. [22]



Obr. 5 - 2: Tok dat mezi jednotlivými podsystemy

Podsystem pro sběr dat vyčítá z výstupu měřící karty sadu dat, která obsahuje pevný počet vzorků (jejich počet v návaznosti na vzorkovací frekvenci určuje délku časového okna). Následně dochází ke vkládání těchto dat do cyklického bufferu, který je typu first-in, first-out s nastavenou délkou (v bufferu dochází k posouvání vzorků a získávání místa pro nové hodnoty je prováděno zapomením nejstarších hodnot). Tento buffer má za úkol uchovávat část průběhů pro možnost jejich zpětného uložení v rámci pre-triggeru. Zároveň jsou tyto data resamplovány na nižší vzorkovací frekvenci (pevně nastaveno 6,4 kHz) a vkládány do datové fronty, která vytváří datové bloky o délce jednoho časového okna. Podsystem pro vyhodnocování dat čte a analyzuje data z těchto datových bloků. Jakmile je tímto podsystemem detekován poruchový stav (splnění triggerovací podmínky), dochází k vydání příkazu k aktivaci záznamu všech měřených průběhů napětí a proudů. Tento proces spuštění záznamu zahrnuje přesunutí aktuálních dat z cyklického bufferu do proměnné se zaznamenanými hodnotami, do které jsou za tyto (pre-trigger) hodnoty následně ukládány aktuální průběhy přímo z podsystemu pro sběr dat (post-trigger). Jakmile délka záznamu dosáhne nastavené hodnoty, PZ zastaví ukládání dat do proměnné a uloží zaznamenané data na záznamové médium.

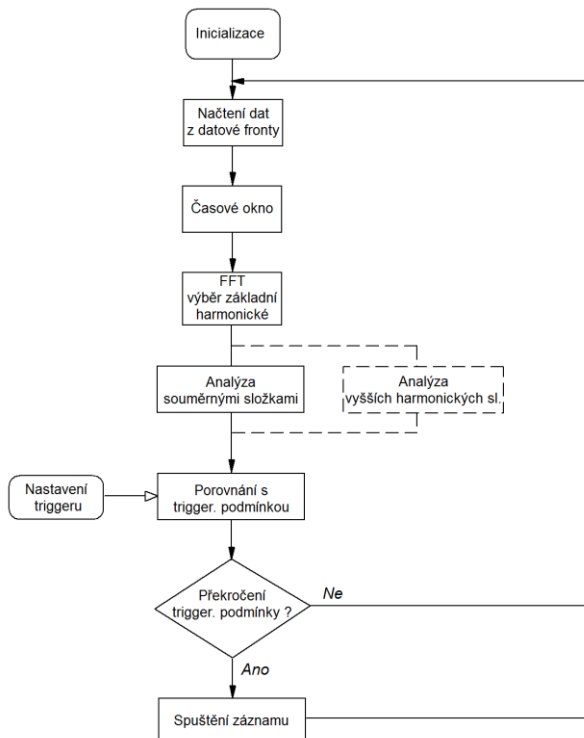
## 5.3 Návrh algoritmu pro vyhodnocení poruchového stavu

Klíčovým procesem pro správnou funkci PZ je algoritmus detekce poruchového stavu. Následující návrh vychází z uváděných analytických metod a metod detekcí poruchových stavů.

Podsystem pro vyhodnocování dat v reálném čase načítá z datové fronty část jednotlivých měřených průběhů o délce časového okna. U navrhovaného záznamníku bylo doporučeno zvolit „dlouhé okno“ o maximální délce 200 ms, což odpovídá 10 periodám základního harmonického průběhu. Tato okna slouží jako proměnné pro následnou analýzu, ve které bude v první řadě prostřednictvím FFT analýzy z náhledu frekvenčního spektra vybrána dominantní frekvenční složka (tj. základní harmonická). V zápětí musí být provedeny analýzy, jejichž výstupy vedou k přímé detekci poruchového stavu, tj. výstupy analýz budou srovnávány s nastavenými hodnotami v triggerovací podmínce. Tyto hodnoty budou nastavitelné dle potřeby tak, aby byla zajištěna korektní detekce poruchy.

Návrh poruchového záznamníku počítá s použitím klíčové triggerovací podmínky založené na napěťových poměrech během poruchy, a to konkrétně na změně hodnoty zpětné složky napětí (bylo nutné zvolit tuto triggerovanou veličinu na rozdíl od „tradičních“ poruchových záznamníků využívající netočivou složku napětí a to z důvodu měření na sekundární straně DTS vn/nn). Pro získání zpětné složky napětí je nutné nejdříve provést analýzu rozkladem do souměrných složek. Uvedená triggerovací podmínka bude založena na vyhodnocování efektivní hodnoty zpětné složky napětí určené v rámci příslušného časového okna. Jakmile úroveň této zpětné složky napětí překročí nastavenou (triggerovací) hodnotou, je provoz sítě vyhodnocen jako poruchový.

V rámci rozšíření práce se počítá s použitím další triggerovací metody založené na detekci obsahu vyšších frekvenčních složek napětí.



Obr. 5 - 3: Diagram algoritmu vyhodnocování poruchového stavu

Kontrola přítomnosti poruchového stavu, resp. splnění triggerovací podmínky musí být prováděna ve smyčkovém cyklu po celou dobu provozu PZ. Po ukončení jednoho cyklu je z datové fronty načteno další časové okno, pro které je proveden znovu vyhodnocovací

algoritmus. Pro dosažení maximalizace rychlosti spuštění záznamu je nutné, aby pokyn k záznamu vydaný v jednom cyklu, spustil záznam v cyklu následujícím.

## 5.4 Záznam dat

Pro tento navrhovaný PZ budou zaznamenávané pouze přímo měřené průběhy, z důvodu požadavku záznamu nezkreslených průběhů a možnosti provedení zpětné analýzy v rámci post-processingu. Tímto se sníží značné množství ukládaných dat a časová i výpočetní náročnost celého procesu zpracování a záznamu. Při detekci poruchového stavu by měla být záznamu přiřazena nejvyšší priorita (např. omezením grafických výstupů) tak, aby bylo minimalizováno riziko ztráty dat. Jak již bylo zmíněno, rozlišení záznamu je odvozeno od vzorkovací frekvence. Jako paměťové médium pro ukládání dat bude použit pevný disk počítače, případně flash disk. Délka pre-triggeru a post-triggeru bude nastavitelná, předběžně se počítá s maximálními délkami záznamu 1 s (pro pretrigger) a 10 s.

## 6 LABVIEW A COMPACTDAQ

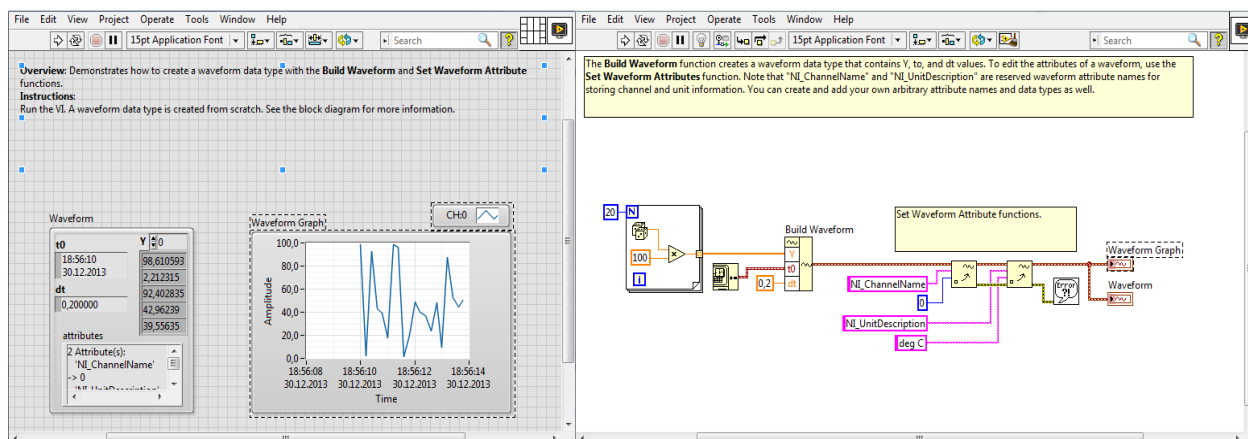
LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) je systémová platforma a grafické vývojové prostředí vyvinuté společností National Instruments. Uživatelům nabízí především možnost sběru dat, propojení měřicího příslušenství a zpracováním dat výpočetní technikou nebo také automatické řízení na různých platformách. Programovací jazyk používaný v LabVIEW vytváří kód a strukturu programu pomocí grafických blokových diagramů, které jsou spojeny s uzly dalších funkčních prvků pomocí nakreslených vodičů. Tyto vodiče představují proměnné a operace v uzlech (funkce, struktury) mohou být provedeny ihned, jakmile jsou dostupná validní vstupní data. Výhodou LabVIEW je, že programátor má předpřipravené jak jednoduché funkce (např. logické) a struktury, tak i hotové podprogramy pro sběr dat, matematickou, signálovou nebo statistickou analýzu, zobrazení, ukládání dat nebo komunikaci s vhodnými periferiemi a další. Tyto programy jsou nazývány jako virtuální nástroje (Virtual Instruments – zkr. VI), protože svým vzhledem a funkcí mohou připomínat reálné přístroje. Každé toto VI je složeno z interaktivního uživatelského rozhraní (čelního panelu) a blokového diagramu. [20]

V dalších podkapitolách je stručně popsáno uživatelské rozhraní LabVIEW a následně periferie řady CompactDAQ, které budou dále využity v praktické části práce.

### 6.1 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní je složeno především z ovládacích prvků (Controls) a indikátorů (Indicators) umístěných na čelním panelu (Front Panel). Ovládací prvky představují vstupy, pomocí kterých uživatel dodává informace VI, kdežto indikátory jsou výstupy, které signalizují nebo zobrazují výsledky v závislosti na přivedených vstupech. Blokový diagram sestává z grafického zdrojového kódu. Veškeré objekty umístěné na čelním panelu mají své terminály v blokovém diagramu, ve kterém jsou také umístěné struktury a funkce provádějící požadované (např. matematické) operace.

Jednotlivé virtuální přístroje lze zařadit do blokových diagramů rozsáhlejších VI, které jsou na vyšší hierarchické úrovni, čímž je dosaženo zjednodušení a zpřehlednění komplikované úlohy. Takto lze tedy úlohy rozdělit do série podřízených „podprogramů“ tzv. subVI, které mohou být spuštěny samostatně, nezávisle na celé aplikaci.



Obr. 6 - 1: Náhled čelního panelu a blokového diagramu

## 6.2 CompactDAQ

NI CompactDAQ je systémem sestávajícím z šasi, NI C I/O modulů, příslušných ovladačů a softwaru, který jako celek zajišťuje měření, zpracování a vyhodnocení analogových i digitálních veličin ve spojení s platformou LabVIEW. Šasi může být připojeno k počítači přes USB, Ethernet nebo WiFi anebo pracovat jako samostatná jednotka řízená vestavěným kontrolorem.

Pro měření uvedených průběhů (kap. 5.1) budou použité NI C I/O moduly, které jsou provedeny jako zásuvné karty, které se zapojí do šasi. Vzhledem k požadavku měření 5 napěťových kanálů budou použity dvě karty NI 9225, které jsou určeny pro měření napětí v rámci výkonových měření, měření kvality elektrické energie atd. v sítích nn. Tato karta má tři vstupní kanály umožňující měření v měřicím rozsahu 300 Vrms s izolací mezi kanály 600 Vrms. Pro měření 6 proudových vstupů byly zvoleny dvě karty NI 9227, které jsou navrženy pro měření až 5 Arms, (reps. 14 A peak). Tyto napěťové i proudové karty umožňují synchronizované měření, s max. vzorkovací frekvencí obou karet až 50 kHz/kanál s rozlišením 24bitů. Obě karty mají také zabudovaný anti-aliasing filter.

Tyto karty budou instalovány do dostupného šasi, v tomto případě 8-slotového USB šasi NI cDAQ-9172, prostřednictvím kterého budou v reálném čase navzorkované hodnoty průběhů převáděny do softwarové části záznamníku v prostředí Labview.



Obr. 6 - 2: NI CompactDAQ šasi a vložené měřicí karty [20]

## 7 OPTIMALIZACE A ROZŠÍŘENÍ FUNKCÍ PORUCHOVÉHO ZÁZNAMNÍKU

Na základě návrhu provedeného v kap. 5 byl v prostředí LabVIEW postupně vyvíjen software poruchového záznamníku, jehož funkce byla průběžně testována a ověřována provozními zkouškami. Tyto zkoušky sestávaly především ze simulování poruchového stavu a to pomocí testeru elektrických ochran Omicron CMC256, následně i na modelu sítě vn (detailnější popis v kap. 10). Tyto zkoušky byly prováděny za účelem vyhodnocování správnosti funkce jednotlivých podsystémů (sběr dat, funkce triggeru, zaznamenávání, atd.) a PZ jako celku. Na základě velkého množství těchto zkoušek byly provedeny níže uvedené úpravy původně navrženého PZ tak, aby byla rozšířená jeho funkčnost, chod softwaru byl stabilní a prostředí uživatelsky přívětivé. V této kapitole jsou tyto změny a příčiny, které k nim vedly, stručně popsány. Popis takto finálně upraveného PZ je uveden v kap. 8.

Při provádění zkoušek měl trigger poruchového záznamníku, resp. proces analýz a vyhodnocení splnění triggerovací podmínky, relativně dlouhou odezvu, proto bylo přistoupeno ke zkrácení délky časového okna na poloviční délku, tj. z 200 ms na 100 ms (tj. 5 period 50 Hz průběhu). Procesy provádění analýz a reakce triggeru se následně dle očekávání urychlily na přijatelnější úroveň.

Problémem, který způsoboval ztrátu navzorkovaných průběhů a pády PZ, se ukázalo být použití vyšších vzorkovacích frekvencí (nad cca 30 kHz) s delšími časy záznamů. Tento problém byl zřejmě způsoben koncepcí navrženého PZ, tj. výpočetní náročnosti procesu bufferování, downsamplingu a tvorby datových bloků při takto velkém množství dat. Vzhledem k faktu, že i v průmyslu aplikované poruchové záznamníky využívají nižších vzorkovacích frekvencí [18], bylo přistoupeno k omezení maximální vzorkovací frekvence na 25 kHz pro krátké záznamy a 10 kHz pro záznamy delší (nad 4 s, podrobněji v kap. 8.1). Aby bylo zamezeno případné nefunkčnosti PZ na základě nevhodného nastavení, je vzorkovací frekvence standardně přiřazená automaticky na základě délky záznamu. Toto přiřazení bylo provedeno na základě četných provozních zkoušek s maximálním počtem měřících kanálů. Také nastavení příliš dlouhého záznamu by mohlo ohrozit stabilitu PZ jako celku a případně způsobit ztrátu dat, proto byly stanoveny maximální délky bufferu a záznamu (2s pro pre-trigger a 10 s pro post-trigger). Pozn.: Byla snaha použít i jiné vzorkovací frekvence (než 25 kHz, resp. 10 kHz), avšak po jejich nastavení byla z nezjištěných příčin reálná hodnota vzorkovací frekvence CompactDAQ měřících karet vždy odlišná od té nastavené a docházelo k nestabilitě aplikace (tj. např. při nastavení 15 kHz, byla reálná  $f_s = 16,6$  kHz nebo při nastavení 20 kHz, byla reálná  $f_s = 25$  kHz, což následně nekorespondovalo s nastaveným počtem vyčítaných vzorků). Z tohoto důvodu bylo upuštěno od použití jiných vzorkovacích frekvencí.

Změna vybraných nastavení (přiřazení kanálů, vzorkovací frekvence, délky doby záznamu) za chodu PZ by mohla způsobit rovněž neočekávané chování softwaru případně neprovedení požadovaných změn korektně. Proto byly samotné nastavení rozdělené na nastavení před spuštěním, které se po spuštění PZ zablokuje změnám, a nastavení po spuštění, které pád aplikace nemůže způsobit. Podrobnosti ohledně nastavení jsou popsány v kap. 8.1 a 8.2.

Po ověření funkčnosti PZ s použitím primární triggerovací podmínky, tj. překročení nastavené hodnoty zpětné složky napětí, byla přidána další triggerovaná veličina, která je odvozená od obsahu vyšších harmonických složek napětí. PZ proto provádí harmonickou analýzu

a z vypočteného napětíového spektra lze vybrat požadovanou vyšší harmonickou složku napětí. Tato vybraná vyšší harmonická složka napětí může být použita k vyhodnocování splnění nastavené triggerovací podmínky.

Původní „typ triggeru“, resp. vyhodnocovací proces splnění triggerovací podmínky, byl založen na porovnávání hodnot průběhu triggerované veličiny s nastavenou hodnotou triggeru. V případě, že sledovaný průběh překročil nastavenou hodnotu, byl stav sítě PZ vyhodnocen jako poruchový. V rámci rozšíření byl PZ přidán další typ triggeru, který vyhodnocoval poruchu na základě poklesu sledovaného průběhu pod zadanou úroveň. Druhý přidáný typ triggeru sleduje rychlost změny, resp. derivaci průběhu sledované veličiny ( $U^{(2)}$  nebo vybrané harmonické složky napětí). Tento typ triggeru je určen pouze pro experimentální účely, protože výsledky derivace mohou být značně zkresleny a nemusí odpovídat reálné změně průběhu. Příčinou je fakt, že vybraná vstupní veličina je aktualizovaná pouze jednou za dané časové okno (100 ms).

V rámci dalšího rozšíření byly přidány funkce pro manuální spuštění triggeru a automatický re-trigger. Použitím manuálního triggeru dochází k vydání pokynu k okamžitému záznamu, bez ohledu na splnění triggerovací podmínky. Vzhledem ke koncepci záznamníku, je záznam opět složen z průběhů uložených v bufferu a průběhů zaznamenaných, po manuálním spuštění záznamu. Funkce automatický re-trigger je určena pro případ záznamu poruch delších, než je maximální délka záznamu nebo většího počtu poruch. Tato funkce po uložení záznamu na pevný disk aktivuje znovu trigger, který opětovně sleduje splnění triggerovací podmínky. S přidáním této funkce bylo nutné vyřešit, aby PZ korektně vyhodnotil situaci a provedl záznam správných průběhů, protože v původním návrhu s touto funkcí nebylo počítáno. Při poruše, jejíž délka byla delší než délka záznamu, docházelo k ukládání dalších záznamů s pretrigger hodnotami prvního záznamu. Proto bylo zavedeno opatření, že v případě, když PZ detekuje poruchu ihned po (dalším) zatriggrování, je buffer automaticky deaktivován a je proveden přímý záznam průběhů pouze o délce post-triggeru. V případě, že poruchový stav bude detekován s dostatečným časovým rozestupem (dán délkou bufferu), bude aktivován buffer a záznam bude sestávat z nastavené délky pre-triggeru a post-triggeru. Detailní popis ovládání je uveden v kap. 8.2.

## 7.1 Návrh dalších optimalizací a úprav pro budoucí použití

V kap. 8 popsaná finální verze poruchového záznamníku má s uvedenými úpravami a při dodržení doporučeného postupu nastavení chod stabilní a uživatel by neměl být schopen v standardním provozu způsobit pád aplikace. Avšak i tento poruchový záznamník má své nedostatky, které by bylo vhodné odstranit při pokračování v jeho dalším vývoji.

Prvním a relativně podstatným faktorem ovlivňující aplikaci PZ byl výše uvedený problém s nastavením jiných vzorkovacích frekvencí. Proto by bylo v rámci dalších úprav PZ nanejvýš vhodné zjistit příčinu tohoto omezení, aby proces záznamu mohl být prováděný s vyšší vzorkovací frekvencí pro detailnější analýzu.

Druhým faktorem ovlivňující chod je samotná koncepce PZ, která se jeví jako relativně výpočetně náročná. Na základě analýzy jednotlivých částí programu, byla jako výpočetně nejnáročnější proces shledána funkce pro downsampling. Proto pro snížení náročnosti PZ by bylo ideálně vhodné změnit tuto část struktury programu a od procesu resamplování úplně upustit. (Byla vyvinutá snaha vynechat tento proces resamplování, avšak všechny tyto pokusy způsobily nekorektní chování navazujících částí programu, zejména vytváření datových bloků o délce

časového okna. Protože se vzniklé problémy nepodařilo odstranit a PZ by stabilní a funkční i s resamplováním, bylo od této úpravy upuštěno).

V rámci dalšího rozšíření funkcí poruchového záznamníku by našlo své praktické uplatnění přidání funkcí pro zpětné provedení příslušných analýz přímo v prostředí PZ. Takto upravený PZ by musel být rozšířen o možnost zpětného načtení vybraného záznamu a funkcemi pro provedení analýz z těchto zaznamenaných hodnot, protože záznam obsahuje neupravené průběhy z jednotlivých měřících kanálů. Prakticky by tato funkce nahradila vybrané post-processing analýzy v externích aplikacích.

Po provedení příslušných úprav by tento navržený PZ mohl být teoreticky upraven na použití na platformě CompactRIO. Přestupem na tuto platformu by se dal PZ přetransformovat na značně automatizovanější a kompaktnější zařízení a to zejména díky tomu, že CompactRIO nemusí mít svůj provoz výhradně řízený přes uživatelské rozhraní v PC, jak je tomu u CompactDAQ. Systém CompactRIO totiž obsahuje vlastní mikroprocesor, který provádí příslušné vyhodnocovací procesy a pro záznam hodnot může mít připojené vlastní datové médium, např. USB flashdisk.  
[23]

## 8 POPIS NAVRŽENÉHO PORUCHOVÉHO ZÁZNAMNÍKU

Na základě vybraných vstupů, navrženého uspořádání a algoritmu vyhodnocování v kap. 5, vybraného příslušenství (kap. 6) a postupné optimalizace (kap. 7) byl v prostředí LabVIEW navržen software poruchového záznamníku využívající vybrané CompactDAQ měřící příslušenství. Finální prostředí, nastavení a jednotlivé funkce záznamníku budou podrobněji popsány v této kapitole, která by měla rámcově sloužit i jako návod k jeho obsluze (z tohoto důvodu se některé informace z předchozích kapitol opakují). Stručný postup nastavení PZ je rovněž uveden v poruchovém záznamníku a detailnější popis jednotlivých parametrů v nápovědě (v programu se zobrazí po stisknutí Ctrl+H). Těmto nastavením musí předcházet zapojení jednotlivých měřících kanálů tak, aby mohly být měřeny požadované průběhy napětí a proudů, např. viz. *Obr. 8 - 1* nebo *Obr. 5 - 1*.

Vzhledem k tomu, že cílem PZ je primárně sledovat a vyhodnocovat napěťové a proudové poměry na sekundární straně DTS, je vhodné připojit vybrané měřící karty NI 9225 pro měření napětí a NI 9227 pro měření proudů (viz. kap. 6.2.). V případě použití jiných měřících karet je nezbytně důležité provést kontrolu jejich měřícího rozsahu s předpokládanými hodnotami měřených napětí a proudů, jinak hrozí destrukce karet. Také je nutné, aby byl počet měřících kanálů shodný s počtem kanálů vybraných karet, jinak poruchový záznamník nebude možné spustit.

Pozn.: Samotný software poruchového záznamníku je umístěn v příloze diplomové práce. Funkčnost PZ je nicméně podmíněná instalací platformy LabVIEW a příslušných ovladačů pro NI CompactDAQ měřící karty.

### 8.1 Nastavení poruchového záznamníku před spuštěním

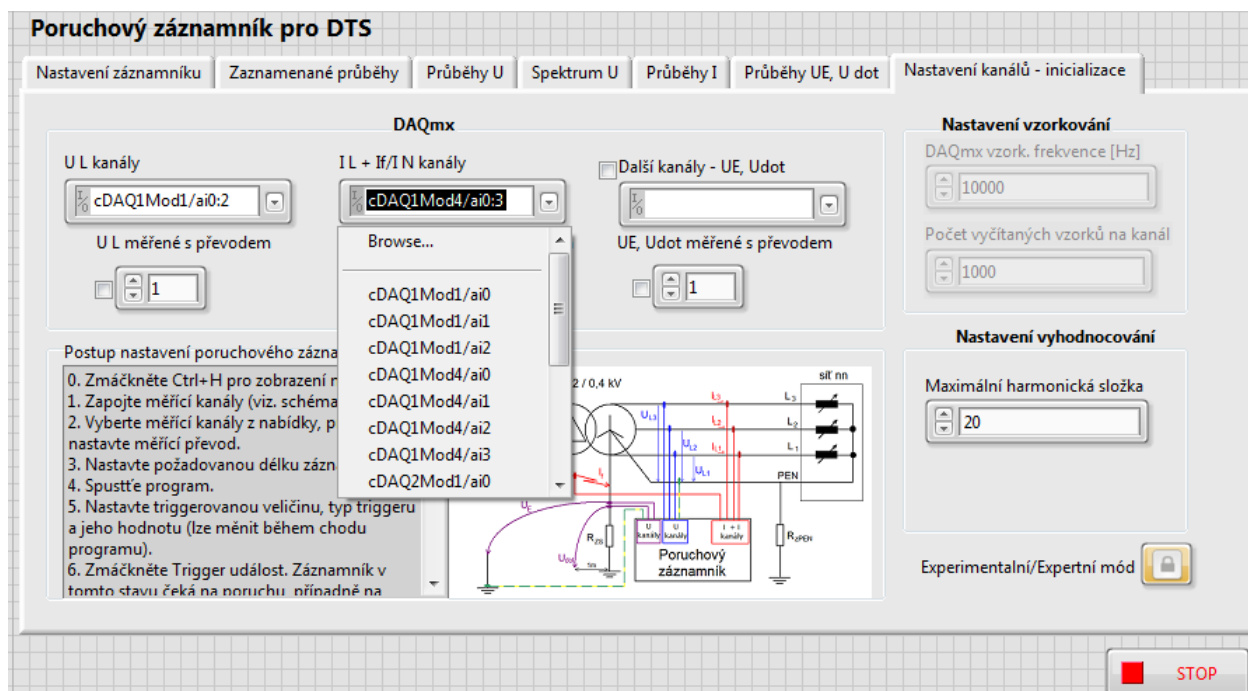
Navržený poruchový záznamník má samotné nastavení rozdělené do dvou rovin, a to nastavení vstupů pro záznamník před jeho spuštěním a nastavení triggeru záznamníku, které lze měnit za chodu PZ. Tento způsob rozdělení nastavení byl zvolen, aby uživatel nemohl zapříčinit nestabilitu PZ, případně nekorektnost záznamu po jeho spuštění. Proto je změna vybraných vstupů a nastavení během chodu záznamníku zablokována.

Jako první krok v rámci nastavení před spuštěním je pro chod poruchového záznamníku nutné přiřadit kanály jednotlivých měřících karet. Postupně je tedy nutné přiřadit jednotlivé měřící kanály (nebo 3-kanálovou měřící kartu), které měří hodnoty fázových napětí ( $U_L$  kanály v *Obr. 8 - 1*). Pořadí kanálů odpovídá sledu fází (může ale např. nastat stav, že vypočtená hodnota zpětné složky napětí se blíží jmenovité hodnotě napětí, po-té je nutné změnit sled měřících kanálů). Pro případ měření s převodem je jej nutné zaškrtnout a nastavit tuto hodnotu převodu. Program následně již pracuje, zobrazuje a zaznamenává v reálných hodnotách.

Analogicky je potřeba přiřadit a nastavit měřící kanály pro měření proudů ( $I_L + I_f / I_N$  kanály) fázovými vodiči. Vzhledem k tomu, že je použita 4-kanálová měřící karta, je k dispozici jeden volný měřící kanál, který může sledovat např. proud tekoucího nulovým vodičem, do uzlu DT nebo poruchový proud, jak tomu bylo při ověřování funkce poruchového záznamníku v kap. 10.

V případě potřeby měření dalších veličin je možno připojit další měřící kartu (s třemi kanály), které mohou být jak napěťové, tak proudové. Protože v navrženém poruchovém záznamníku byly tyto kanály vyhrazeny k měření změny potenciálu na uzemnění a dotykového napětí jsou v nastavení PZ označeny jako „Další kanály –  $U_E, U_{dot}$ “.

Výběr měřících kanálů, případně nastavení jejich měřících převodů je nutné provést před spuštěním PZ, protože během jeho chodu je změna zablokována.



Obr. 8 - 1: Náhled okna nastavení kanálů poruchového záznamníku

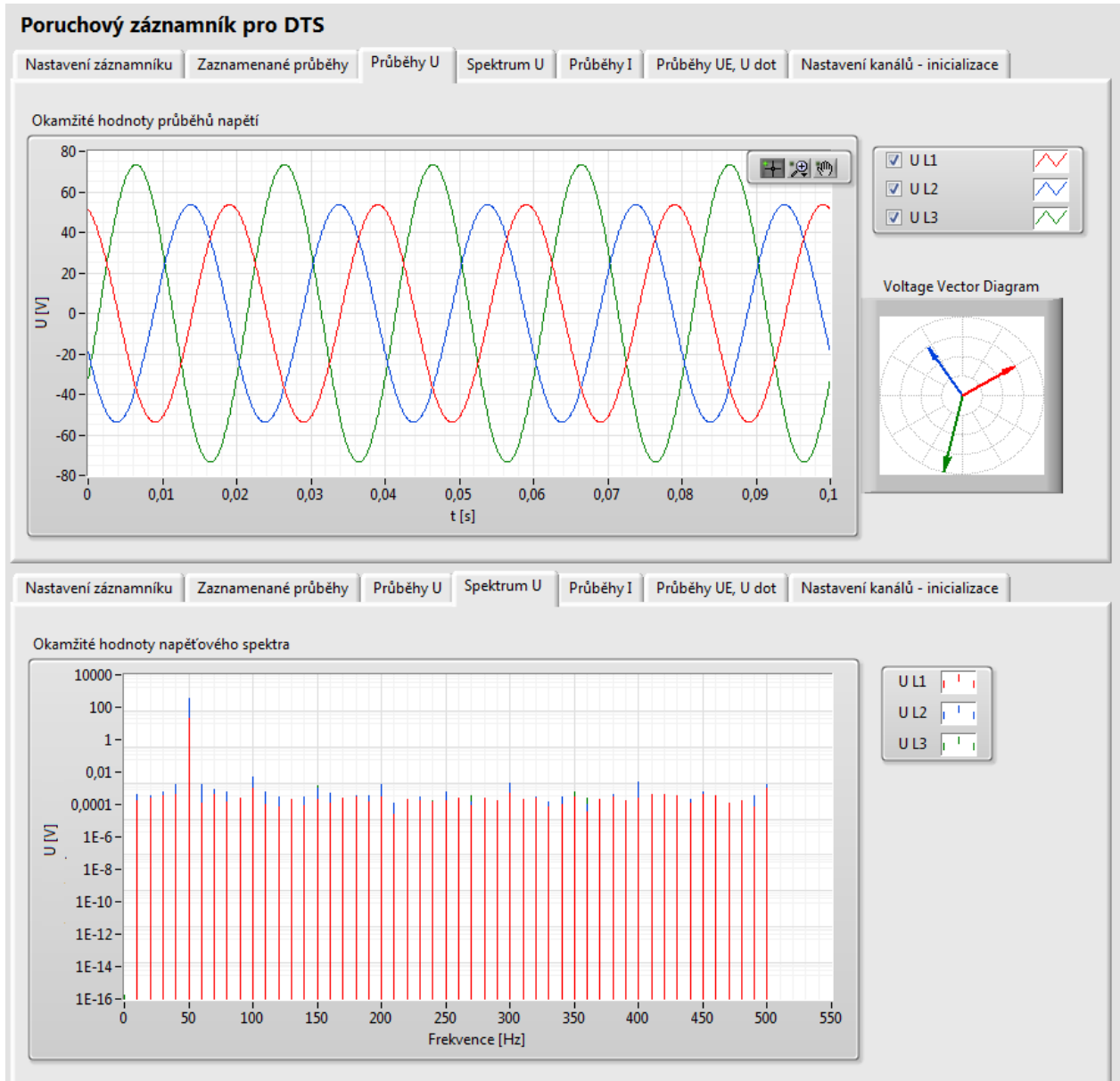
V okně nastavení kanálů jsou také zobrazeny nastavení hodnot vzorkovací frekvence měřících karet a počtu vyčítaných vzorků na kanál. DAQmx vzorkovací frekvence udává s jakou vzorkovací frekvencí jsou měřícími kartami snímány průběhy z jednotlivých kanálů, tak i rozlišení ukládaného záznamu. Počet vyčítaných vzorků na kanál udává množství vzorků umístěných do jednoho časového okna, určeného k následné analýze. Vzhledem k délce vyhodnocovacího okna 100 ms je tento počet vzorků vzhledem ke vzorkovací frekvenci v poměru 1:10. V rámci standardního chodu PZ jsou tyto hodnoty (vzorkovací frekvence a v návaznosti na to i počet vyčítaných vzorků) nastavovány automaticky dle nastavené délky záznamu (bez ohledu na délku bufferu). Pro detailnější záznamy kratších událostí (délka post-triggeru do 2 s), např. počátek vzniku poruchy, je nastavena vzorkovací frekvence 25 kHz a pro delší záznamy nad 2s je nastavena frekvence 10 kHz.

V rámci nastavení vyhodnocování lze nastavit řád vypočtené harmonické složky spektra napětí. Tyto vyšší harmonické složky lze následně sledovat (Obr. 8 - 2) a případně na základě jejich úrovně lze vyhodnocovat splnění triggerovacích podmínek.

Okno nastavení kanálů také obsahuje tlačítko Experimentální/Expertní mód, které když se při vypnutí programu vymáčkne, dojde k deaktivaci pevného nastavení vzorkovací frekvence a počtu vyčítaných vzorků a je umožněno změnit tyto hodnoty pro další spuštění. Je nutné podotknout, že tyto změny mohou vést k nestabilitě PZ a pádu programu. Při následujícím spuštění se poruchový záznamník uvede do standardního chodu s hodnotami, při kterých funguje ověřeně a stabilně.

Na Obr. 8 - 3 je vyobrazen náhled okna pro nastavení záznamníku. V rámci nastavení před spuštěním je nutné nastavit především požadovanou délku záznamu (post-trigger) a bufferu (pre-trigger), protože jsou od nich vyvozeny výše zmíněné nastavení, které za chodu programu již nebude možné změnit. Maximální délka záznamu (post-trigger) je 10 s a pre-triggeru 2s.

Jsou-li všechny uvedené nastavení provedeny, lze spustit poruchový záznamník a přejít k nastavení triggeru. Po spuštění záznamníku lze také sledovat v příslušných záložkách aktuální průběhy měřených kanálů napětí, proudů nebo také rozložení harmonických složek v napětěovém spektru. Tlačítko „STOP“ vypíná PZ za jakékoliv situace.



Obr. 8 - 2: Náhled oken se zobrazením okamžitých průběhů napětí a napětěového spektra

## 8.2 Nastavení poruchového záznamníku – trigger

Samotné nastavení triggeru a jednotlivých jeho možností je vhodné provádět za běhu programu tak, aby bylo možné provést jeho korektní nastavení dle sítě bez poruchy. V první řadě je zapotřebí vybrat „Triggerovanou veličinu“ (viz. Obr. 8 - 3). Primárně vyhodnocovanou triggerovanou veličinou pro detekci poruchy je efektivní hodnota zpětné složky napětí (základní harmonické), nicméně lze sledovat i úroveň vyšších harmonických složek napětí (opět je vyhodnocována RMS hodnota). Výběr harmonické složky, která bude zobrazována a na kterou bude trigger reagovat, se provede pomocí menu „Sledovaná harmonická složka“.

Další možností nastavení je výběr typu triggeru, na základě kterého PZ vyhodnocuje, jestli průběh triggerované veličiny překročil nastavenou hodnotu, případně klesl pod ní. Poslední možností je triggerování na základě rychlosti změny sledované veličiny, resp. její derivace (po aktivování se zobrazí se okno s vypočtenými derivacemi průběhů). Tento typ triggeru je však určen víceméně pouze pro experimentální účely.

Pro správnou reakci PZ na poruchu je nutné provést nastavení „Trigger hodnoty“, která je klíčová pro vyhodnocení poruchového stavu. Pro zjištění úrovně zpětné složky napětí a vybrané harmonické složky v síti bez poruchy jsou v panelech napravo zobrazeny náhledy aktuálně vypočtených hodnot. Na základě znalosti těchto hodnot triggerovaných veličin v síti bez poruchy lze přesněji definovat hodnotu triggeru, při které PZ vyhodnotí již jako poruchový a spustí záznam. Případné překročení nastavené hodnoty triggeru indikuje příslušná kontrolka.

Obr. 8 - 3: Náhled okna nastavení triggeru a záznamu poruchového záznamníku

Uvedení záznamníku do aktivního chodu se provede stisknutím tlačítka Trigger-událost. V tento moment je spuštěn proces vyhodnocování sledované veličiny, zdali nebyla splněna triggerovací podmínka (např. překročení definované úrovně  $U^{(2)}$ ). Souběžně PZ uvede do chodu cyklický buffer (pre-trigger), ve kterém jsou uchovávané přímo měřené průběhy po stanovenou dobu. Se „zatriggerováním“ také dojde automaticky k zablokování změn nastavení triggeru a zastavení vykreslování všech průběhů, z důvodu snížení výpočtové náročnosti vykreslování. V momentě, když PZ vyhodnotí splnění triggerovací podmínky, dojde k vydání signálu ke spuštění zaznamenávání hodnot. V tento okamžik je zastaveno ukládání průběhů do bufferu a přímo začnou být postupně ukládány aktuálně měřené průběhy. V případě, že by záznamník detekoval poruchu ihned s aktivací triggeru, dojde k přímému záznamu bez použití bufferu. Záznamník mimo jiné informuje o spuštění záznamu příslušnou kontrolkou a také zobrazí čas detekce poruchy. Jakmile délka záznamu dosáhne nastavenou hodnotu, je sběr dat zastaven a dojde k automatickému uložení zaznamenaných hodnot (více informací v kap. 8.3) a nakonec k deaktivaci triggeru. Stav PZ následně odpovídá stavu po spuštění (tj. jsou zobrazovány okamžité průběhy, lze měnit nastavení triggeru).

Další funkci, kterou lze po „zatriggerování“ použít je manuální trigger, pomocí kterého lze manuálně vytvořit popud k spuštění záznamu. Pro sledování aktuálně měřených a do bufferu ukládaných průběhů, lze využít zobrazovací okno s jejich náhledem. Vzhledem k navrženému řešení PZ je záznam opět složen z průběhů v bufferu a z průběhů zaznamenaných po stisknutí tlačítka. Proto je vhodné prodloužit délku bufferu na maximální délku, aby uživatel stihl zareagovat na očekávaný průběh, jenž chce zaznamenat.

V případě, že je požadavek na záznam více poruch, případně záznam poruch delších než je maximální možná délka, lze použít „Auto-retrigger“. Po aktivování této funkce PZ nadále očekává splnění triggerovací podmínky, avšak po zaznamenání a uložení poruchových průběhů dojde k opětovnému aktivování triggeru. Chování triggeru s touto funkcí je totožné jako bez ní, v případě dvou poruch s dostatečným rozestupem mezi sebou je záznam složen z bufferovaných průběhů (pre-triggeru) a post-triggeru. V případě delší poruchy než je nastavená délka záznamu, PZ automaticky provádí přímý záznam bez bufferovaných průběhů. Nevýhodou je, že v tomto případě mezi jednotlivými záznamy vznikají rozestupy, které jsou dané především zápisem průběhů do souboru.

### 8.3 Výstupy poruchového záznamníku

Vzhledem k potřebě provozu PZ bez obsluhy je uložení zaznamenaných průběhů prováděno automaticky ihned po tom, co je dosažena požadovaná délka záznamu. PZ vytvoří v místě svého uložení na pevném disku nový adresář s názvem „/data“, ve kterém vytvoří podadresář s datem záznamu, např. „/140519“. Do této složky PZ v rámci procesu ukládání uloží dva tabulkové soubory. Pro lepší orientaci v záznamech názvy obou souborů obsahují přesné datum detekce poruchy (např. record\_140519\_14h29m01s.xls). První soubor obsahuje záznam naměřených průběhů pro jednotlivé kanály a druhý soubor, jehož název je rozšířený o „\_setting“ obsahuje zvolené nastavení PZ, jako vzorkovací frekvence, nastavení triggeru, převod měření atd. Náhled výstupních souborů vytvořených PZ je zobrazen v Tab. 8 - 1 a Tab. 8 - 2.

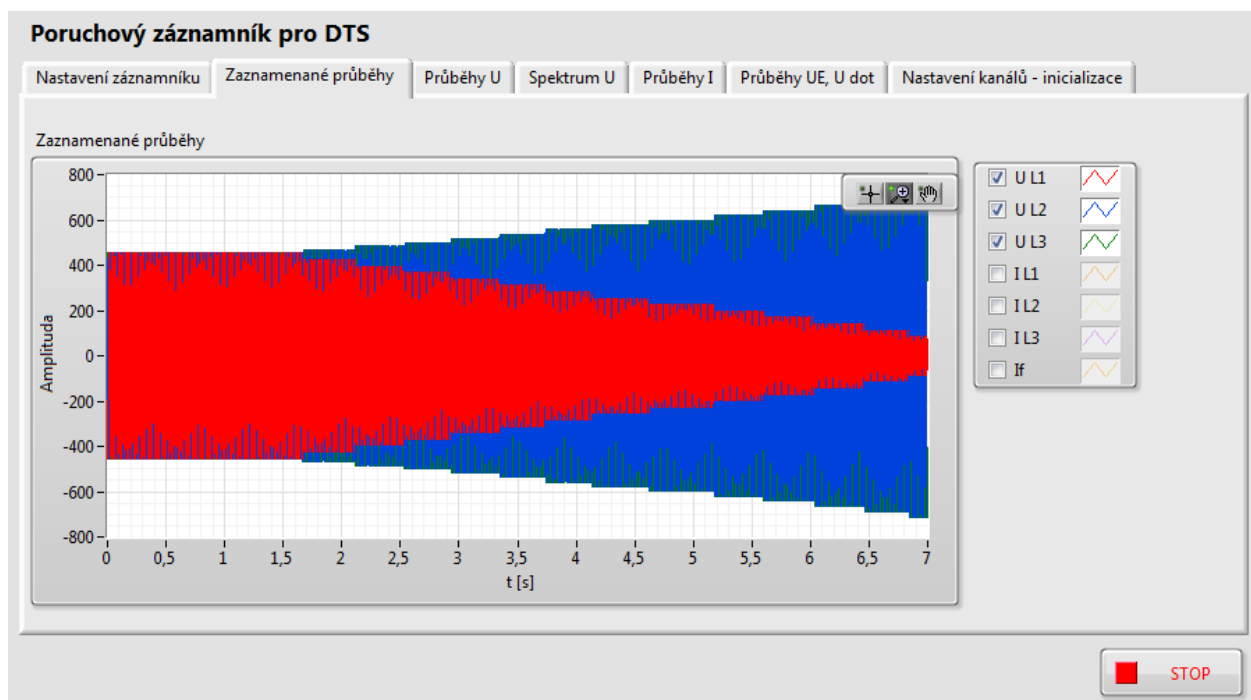
Tab. 8 - 1: Náhled části výstupního souboru s naměřenými hodnotami

Time (s)	UL1 (V)	UL2 (V)	UL3 (V)	IL1 (A)	IL2 (A)	IL3 (A)	IfIN (A)
0	-333,696	431,4991	-97,9384	-0,00146	-0,0007	-0,00063	-0,00041
0,0001	-343,135	427,0154	-83,9556	-0,00127	-0,00058	-0,00046	-0,00066
0,0002	-352,262	422,0773	-70,0117	-0,00118	-0,00077	-0,00082	-0,0006
0,0003	-361,01	416,746	-55,8894	-0,00114	-0,00063	-0,00049	-0,00035
0,0004	-369,322	411,0205	-41,7503	-0,00092	-0,00079	-0,00069	-0,0006
0,0005	-377,394	404,8749	-27,5728	-0,00143	-0,00094	-0,0006	-0,00036
0,0006	-385,079	398,3245	-13,4247	-0,00134	-0,00093	-0,00036	-0,00017
0,0007	-392,379	391,4006	0,79676	-0,00132	-0,0007	-0,00052	-0,00033
0,0008	-399,198	384,0471	15,09661	-0,00136	-0,00098	-0,00052	-0,00018
0,0009	-405,694	376,35	29,29481	-0,00107	-0,00094	-0,00022	-0,00047

Tab. 8 - 2: Náhled výstupního souboru s nastaveními

Cas poruchy (hod:min:s_mm/dd/yy)	14:29:01_05/15/14
DAQmx vz. frekvence (Hz)	10000
Delka bufferu (s)	1
Delka zaznamu(s)	5
Trigger velicina (-)	Zpětná složka napětí - u2
Trigger hodnota (V/-)	10
Typ triggeru	Nad úrovní
Sledovana harmonicka	1
UL mereno s prevodem	Ano
UL prevod(-)	10
IL mereno s prevodem	Ano
IL prevod(-)	1
UE Udot mereno s prevodem	Neměřeno
UE prevod(-)	0

Pro orientační vyhodnocení a náhled zaznamenaných hodnot v rámci prostředí PZ lze po uložení záznamu aktivovat okno „Zaznamenané průběhy“ (viz. Obr. 8 - 4). V tomto okně jsou vykresleny zaznamenané průběhy pro všechny měřené kanály a je možné jednotlivé kanály vypínat, resp. zapínat a detaily průběhů přibližovat resp. oddalovat.



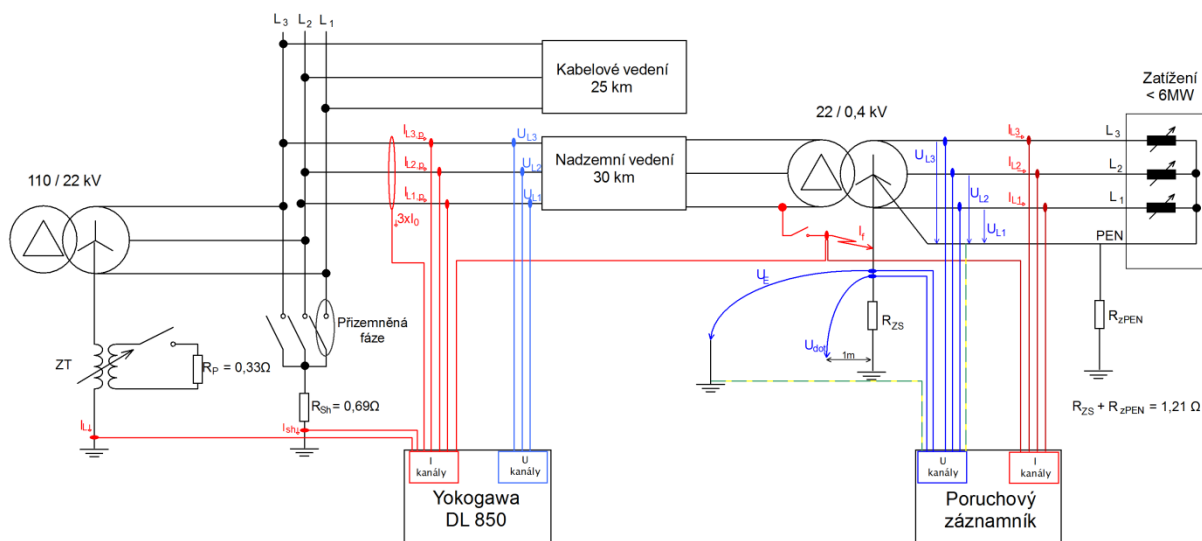
Obr. 8 - 4: Náhled okna se zaznamenanými průběhy

## 9 OVĚŘENÍ FUNKCE PORUCHOVÉHO ZÁZNAMNÍKU

Pro ověření správnosti funkce navrženého poruchového záznamníku bylo nutné provést měření, které by přibližně odpovídalo reálné situaci v elektrické síti během poruchy v síti vn. Za tímto účelem byl sestaven model sítě, na kterém byla provedena simulace poruchy a vyhodnocení tohoto měření resp. záznamu.

### 9.1 Popis modelu sítě a zapojení zařízení

Zmiňovaný model sítě se skládá z modelu napájecí rozvodny vvn/vn (110/22 kV, v modelovém měřítku 400/100V), která je vybavena laditelnou zhášecí tlumivkou, automatikou připínání pomocného odporu ( $3 \times 1 \Omega$  paralelně) a také automatikou přizemnění vybrané fáze během poruchy. Tato rozvodna napájí síť vn 22 kV (jmenovité napětí modelu je 100 V) sestávající z kabelového a venkovního vedení, viz. Obr. 9 - 1, na jehož konci je připojen transformátor vn/nn (22/0,4 kV, v modelovém měřítku 100/400 V) se zapojením Dyn1. Tento transformátor napájí následně regulovatelnou zátěž s maximálním ekvivalentním odběrem na vn straně DT 6 MW (odběr cca 173 W v nn síti modelu).



Obr. 9 - 1: Schéma zapojení měřeného modelu sítě vn/nn a měřících zařízení

Pozn.: Veškeré hodnoty uvedené ve schématu a v dalších podkapitolách jsou pro síť vn uváděny pro jmenovité napětí 22 kV, přepočteno pomocí převodních poměrů dle Tab. 9 – 1.

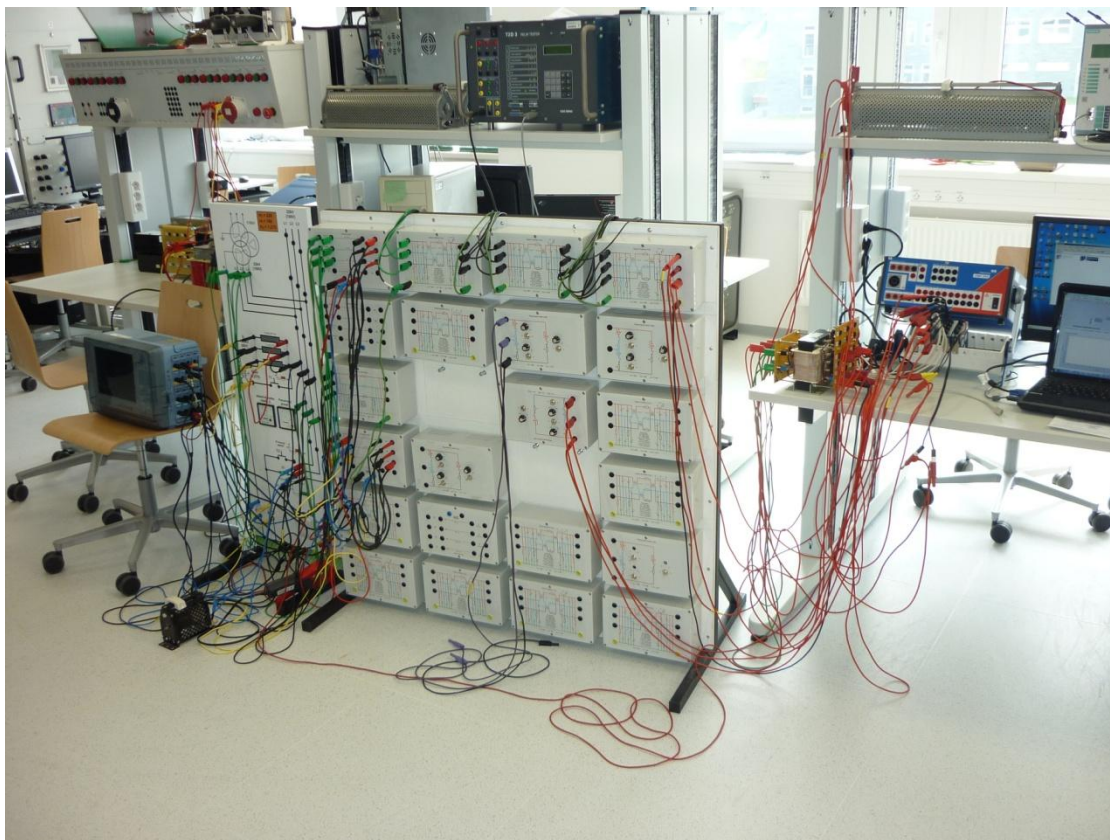
Tab. 9 - 1: Převodní poměry pro model sítě

Poměrná veličina	Hodnota poměru
$m_u$	220
$m_i$	160
$m_z$	1,375

Dle návrhu v kap. 5.1 byly na sekundární svorky transformátoru vn/nn umístěny měřící kanály poruchového záznamníku pro měření fázových napětí a proudů. Dále PZ monitoroval

hodnotu poruchového proudu  $I_f$ , hodnotu navýšení potenciálu zemnicí soustavy  $U_E$  a dotykového napětí  $U_{dot}$  v této fiktivní trafostanici. Vzhledem k vybraným měřicím kartám pro PZ (kap. 6.2) byly veškeré sledované hodnoty měřeny v poměru 1:1 bez nutnosti použití sond nebo převodníků.

Pro vyhodnocení správnosti funkce poruchového záznamníku a jím zaznamenaných hodnot, bylo nutné provést kontrolní měření se záznamem sledovaných průběhů během téže simulované poruchy. Za tímto účelem byl použit osciloskop-záznamník Yokogawa DL 850, který měřil hodnoty fázových napětí a proudů na výstupu z rozvodny vvn/vn (viz. Obr. 9 - 1). Tento osciloskop dále monitoroval hodnotu netočivé složky proudu  $I_0$  tekoucího vedením, velikost poruchového proudu  $I_f$  a hodnoty proudů tekoucích zhášecí tlumivkou  $I_L$  a v místě přizemnění fáze  $I_{sh}$ . Měřené napětí byly měřeny přímo prostřednictvím napěťových sond s měřicím poměrem 1:1, kdežto pro měřené proudy byly použity senzory LA 25-NO/SP8 (pracující na principu hallové sondy) s jmenovitým proudem 2 A hallové sondy s převodním poměrem 4 V/2 A. Pro měření netočivé složky proudu byl využit klešťový ampérmetr, jehož napěťový výstup byl připojen na osciloskop. Hodnota fázového napětí a netočivé složky napětí byly měřeny přímo i v rozvodně.



Obr. 9 - 2: Sestavený model sítě s měřicími zařízeními

V napájecí rozvodně byl k vinutí tlumivky paralelně připojen odporník  $R_p$  ( $3 \times 1 \Omega$  paralelně). Tento odporník je připínán se zpožděním 2 s po počátku poruchy po dobu 1 s a má simulovat reálné pochody v rozvodně, při kterých je pomocí odporníku uměle navýšena činná složka poruchového proudu pro detekci poruchy ochranami. Jak již bylo zmíněno, je fiktivní rozvodna vybavena technikou přizemnění postižené fáze 1,5 s po odepnutí pomocného odporníku, tak aby došlo ke vzniku paralelní cesty k poruchovému proudu a tím k jeho přerozdělení a omezení.

## 9.2 Popis postupu měření a nastavení zařízení

Pro simulaci poruchy byla zvolena fáze L1 a za místo zemní poruchy byl vybrán konec venkovního vedení, resp. svorky transformátoru vn/nn. Toto místo poruchy bylo vybráno tak, aby odpovídalo reálné poruše průrazu průchodky na nádobu transformátoru.

Po sestavení a ověření správnosti zapojení modelu sítě bylo následně nutné provést vyladění zhášecí tlumivky tak, aby byl kapacitní proud zemního spojení zcela kompenzován. Tohoto vyladění bylo dosaženo uvedením sítě do poruchového stavu a následnou manuální regulací proudu tlumivkou (pomocí zasouvání/vysouvání jádra tlumivky) tak, aby byla hodnota výsledného poruchového proud co nejnižší, resp. síť byla při poruše ve stavu blízkém stavu rezonance. Tato síť s naladěnou zhášecí tlumivkou by měla přibližně odpovídat stavu a chování sítě vn během poruchy. Hodnota zátěže byla nastavena tak, aby ani během poruchy hodnoty proudů tekoucích proudovými senzory s rezervou nepřekročily maximální dovolenou mez. Následně byla síť uvedena zpět do bezporuchového stavu.

V modelu sítě v takto bezporuchovém stavu byly uvedeny do chodu monitorovací zařízení tj. osciloskop-záznamník Yokogawa na vn straně a poruchový záznamník na straně nn. Poté bylo nutné provést sledování průběhů hodnot v síti během bezporuchového provozu pro korektní nastavení úrovně triggeru. U poruchového záznamníku byla vybrána jako triggerovací podmínka sledování překročení hodnoty zpětné složky napětí a při  $U^{(2)} \geq 4$  V byl stav sítě vyhodnocen jako poruchový a automaticky došlo ke spuštění záznamu. U osciloskopu trigger sledoval přímo hodnotu poruchového proudu a při překročení hodnoty  $I_f \geq 40$  A byl rovněž spuštěn záznam. U obou zařízení byla délka záznamu nastavena tak, aby postihla všechny děje během poruchy, tj. délka pre-triggeru byla nastavena na 1 s a post-triggeru na 8 s (resp. 9 s u osciloskopu).

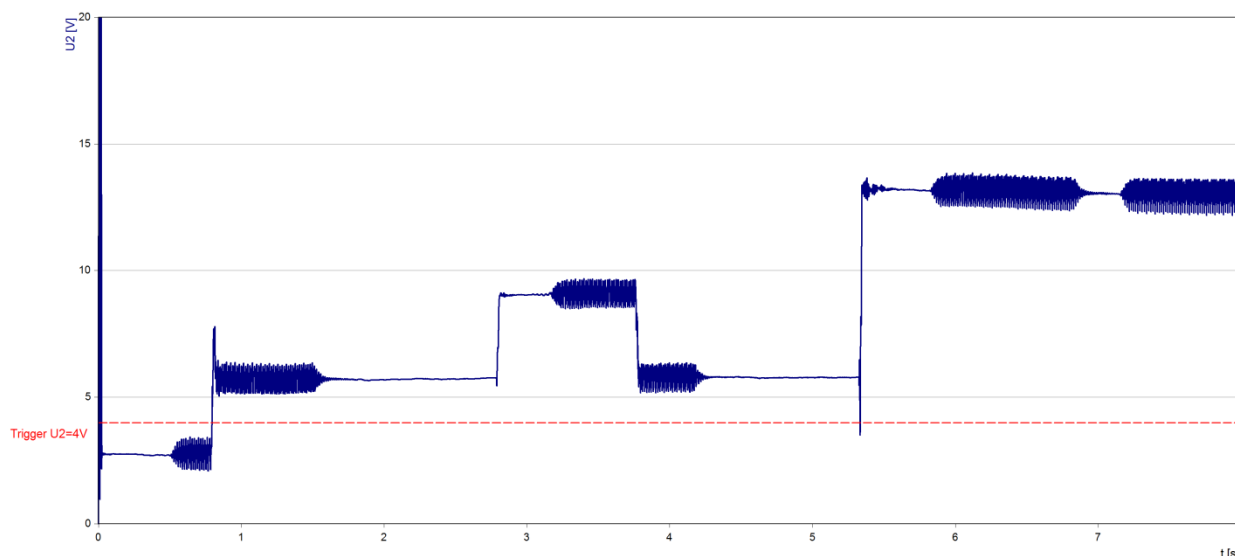
Tab. 9 - 2: Rekapitulace nastavení záznamových přístrojů

Veličina	Hodnota (PZ)	Hodnota (Yokogawava)
Trigger	$U^{(2)}$	$I_f$
Úroveň triggeru	4 V	40 A
Vzorkovací frekvence	10 kHz/s	2 kHz/s
Délka záznamu	9 s (1/8 s)	10 s (1/9 s)
Zaznamenávané průběhy veličin	$U_{L1}, U_{L2}, U_{L3},$ $I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}, I_f,$ $U_E, U_{dot}$	$U_{L1,p}, U_{L2,p}, U_{L3,p},$ $I_{L1,p}, I_{L2,p}, I_{L3,p},$ $I_0, I_f, I_L, I_{sh}$

Po uvedení obou zařízení do stavu monitorující průběhy a čekání na splnění triggerovací podmínky byla manuálně, pomocí vypínače, vytvořena porucha ve fázi L1. Následovaly výše popsané pochody, tj. dočasné sepnutí odporu  $R_p$ , přizemnění postižené fáze v daném čase a poté byla porucha opět manuálně vypnuta. Ihned po výskytu poruchy měly obě zařízení provést rozpoznání poruchy a následně spustit záznam. Vyhodnocení správnosti funkce rozpoznání poruchy poruchovým záznamníkem a jim zaznamenaných hodnot se věnuje následující kapitola.

### 9.3 Vyhodnocení záznamu poruchového záznamníku na straně nn

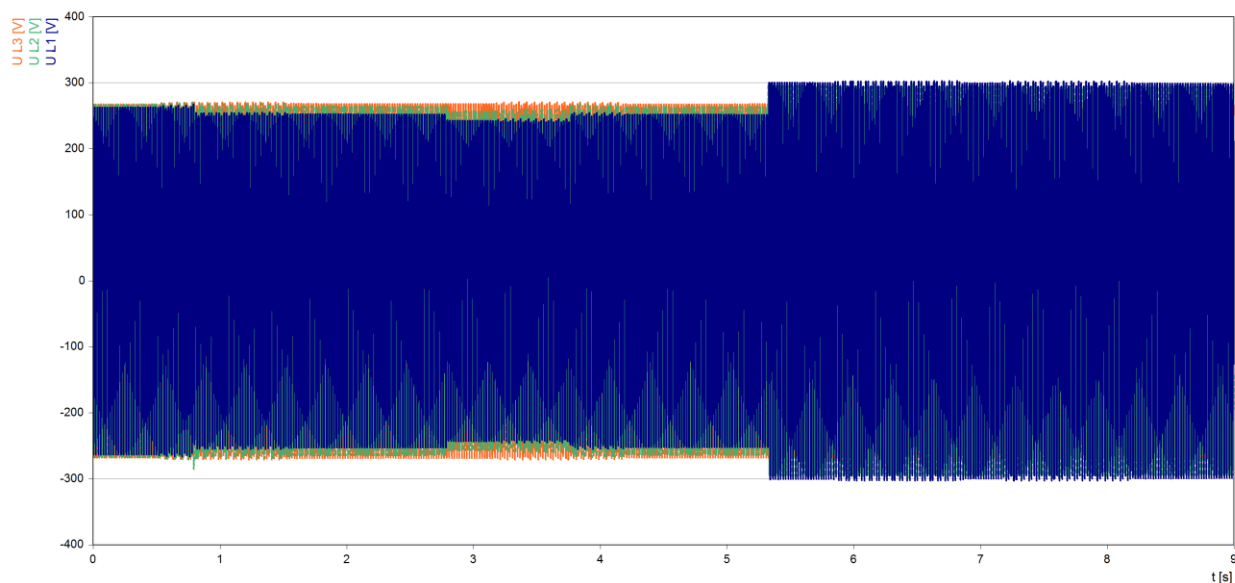
Vzhledem k účelu PZ je stěžejní funkcí poruchového záznamníku detekce poruchy, proto bylo nutné v první řadě vyhodnotit správnost reakce na překročení triggerovací hodnoty, tj. překročení hodnoty zpětné složky napětí  $U_2$ . Jak lze vidět na *Obr. 9 – 3* a následujících průbězích, které byly pořízené navrženým poruchový záznamníkem, byl poruchový stav správně vyhodnocen a došlo ke spuštění záznamu. PZ tedy detekoval poruchu, zastavil průběžné ukládání hodnot do bufferu a spustil záznam se zpožděním cca 0,2 s, tj. porucha nastala v čase  $t = 0,8$  s, kdy hodnota  $U^{(2)}$  značně stoupla na hodnotu 7,7 V. Na základě vyobrazeného průběhu zpětné složky napětí lze konstatovat, že po celou dobu záznamu byla překročena triggerovací hodnota a že připnutí pomocného odporu a přizemnění postižené fáze způsobily další značné nárůsty hodnot  $U^{(2)}$  a to až na hodnotu 13,7 V.



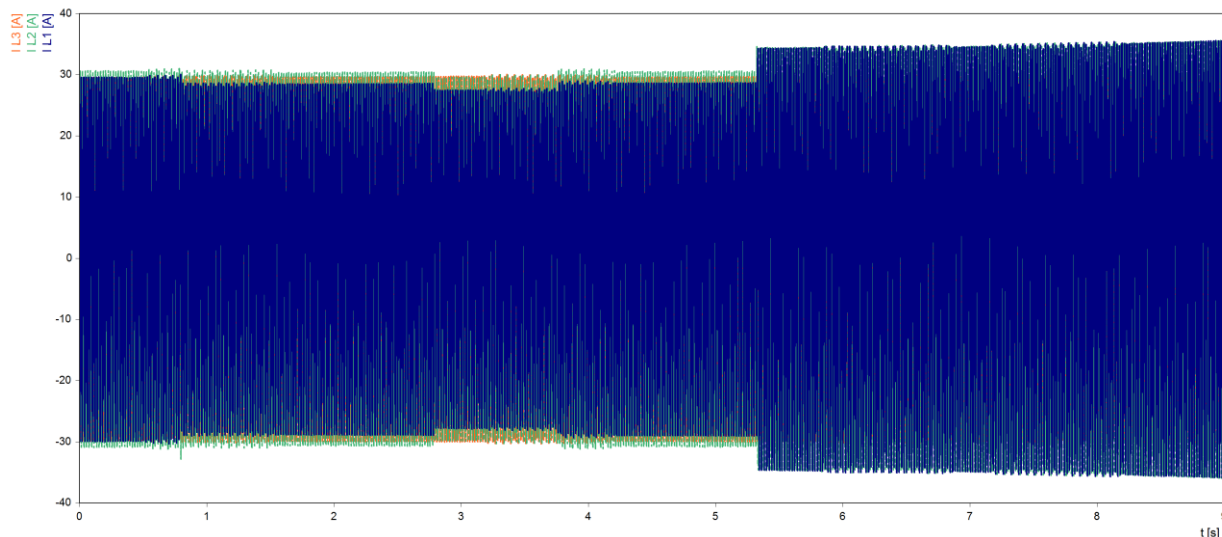
*Obr. 9 - 3: Průběh efektivní hodnoty zpětné složky napětí  $U_2$  během poruchy*

Ze zaznamenaných hodnot napětí na straně nn (viz. *Obr. 9 - 4*), lze vysledovat, že před poruchou všechny fázové hodnoty napětí měly totožnou velikost cca 190 V, resp. 268 V v amplitudě (veškeré následující uvedené hodnoty jsou vztahovány k efektivním hodnotám průběhů). Mírný pokles napětí nastal v čase 0,8 s, kdy došlo ke vzniku poruchy. Jednalo se pokles v postižené fázi L1 přibližně o cca 10 V, u L2 o 5 V. Napětí fáze L3 zůstalo nezměněné. V čase 2,8 s došlo k připnutí odporu a lze pozorovat po dobu jeho připojení další pokles fázových napětí, který činil u fází L1 a L2 cca 8 V. Po jeho odpojení se hodnoty napětí vrátily na předcházející hodnotu. V době 5,3 s od počátku záznamu došlo k přizemnění postižené fáze, což způsobilo navýšení hodnot fázových napětí ve fázi L1 o 22 V (na 212 V, 300 V v amplitudě) a u fáze L2 o 21 V (na 206 V). Hodnota napětí fáze L3 se nezměnila.

U průběhů proudů lze pozorovat od počátku mírnou nesymetrii zatížení, fázemi L1 a L3 tekla proud 21,0 A a fází L2 21,6. Zaznamenané průběhy proudů na nn straně transformátoru během poruchy kopírují tendence změn průběhů napětí. Při vzniku poruchy došlo k poklesu proudů tekoucích fázemi L1 a L2 o cca 0,8 A, resp. 0,4 A. Připojení odporu vedlo k dalšímu poklesu o cca 0,6 A u fází L1 a L2. Po přizemnění fáze L1 došlo k nárůstu proudů tekoucími fázemi L1 a L2 na hodnotu 24,3 A. Hodnota proudu tekoucího fází L3 se během všech těchto dějů nezměnila. Hodnoty těchto průběhů proudů jsou fiktivní, pro lepší interpretaci záznamu byly reálně zaznamenané hodnoty přepočtené přes modelové měřítko proudu  $m_i = 160$ .



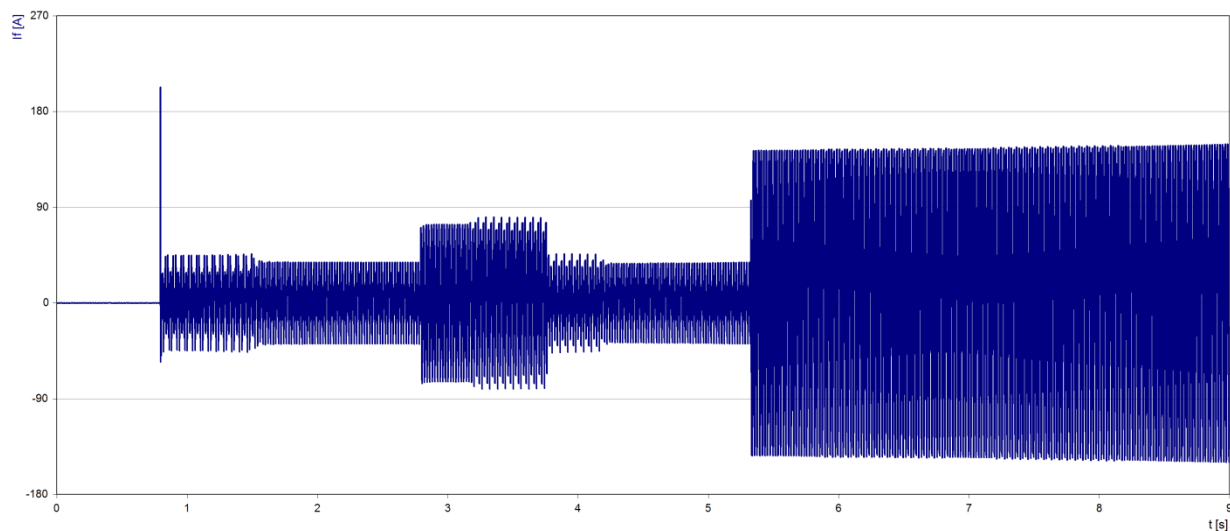
Obr. 9 - 4: Zaznamenané průběhy napětí ( $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$ ,  $U_{L3}$ ) během poruchy



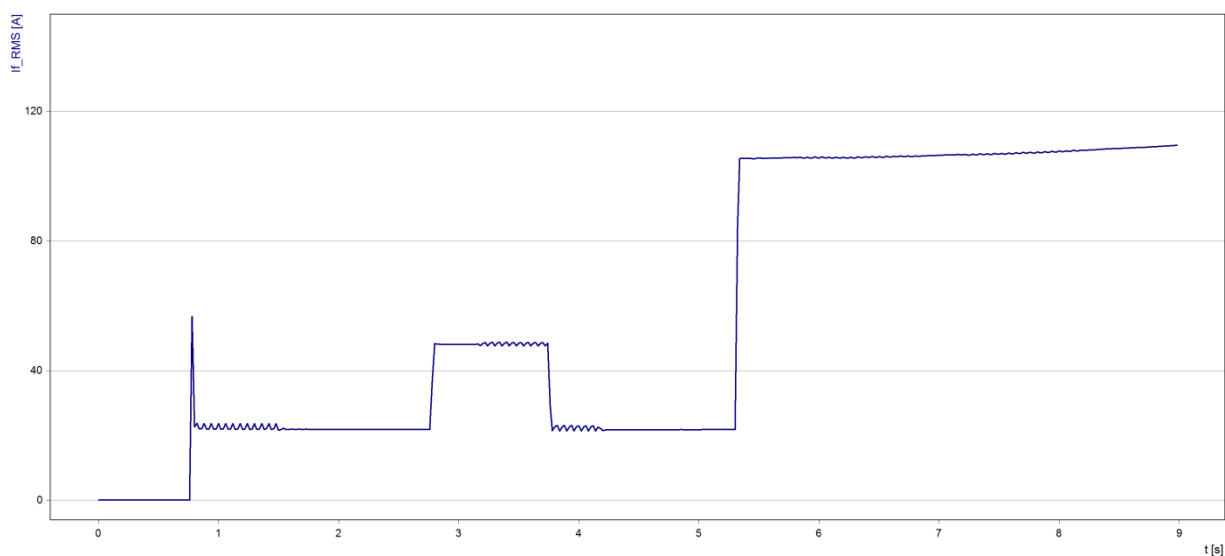
Obr. 9 - 5: Zaznamenané průběhy proudů ( $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ,  $I_{L3}$ ) během poruchy

V okamžiku vzniku poruchy došlo k vytvoření poruchového proudu s výraznou proudovou špičkou, která dosáhla amplitudy 203 A. Následně se průběh poruchového proudu ustálil na hodnotě 27,2 A. Po 2 s od vzniku poruchy došlo k sepnutí pomocného odporníku. Zde lze z naměřeného průběhu vysledovat splnění účelu tohoto procesu a tím je navýšení hodnoty poruchového proudu a to téměř na dvojnásobnou hodnotu 51,6 A. Po odepnutí odporníku se proud vrátil na předchozí hodnotu. Po přizemnění postižené fáze došlo ke změně proudové smyčky, kterou se uzavírá poruchový proud, proto došlo ke značnému nárůstu zaznamenaných hodnot. Tato situace je podrobněji popsána v následující podkapitole. Průběh poruchového proudu je vyobrazen na *Obr. 9 - 6*, *Obr. 9 - 7* a detail okamžiku vzniku poruchy na *Obr. 9 - 9*.

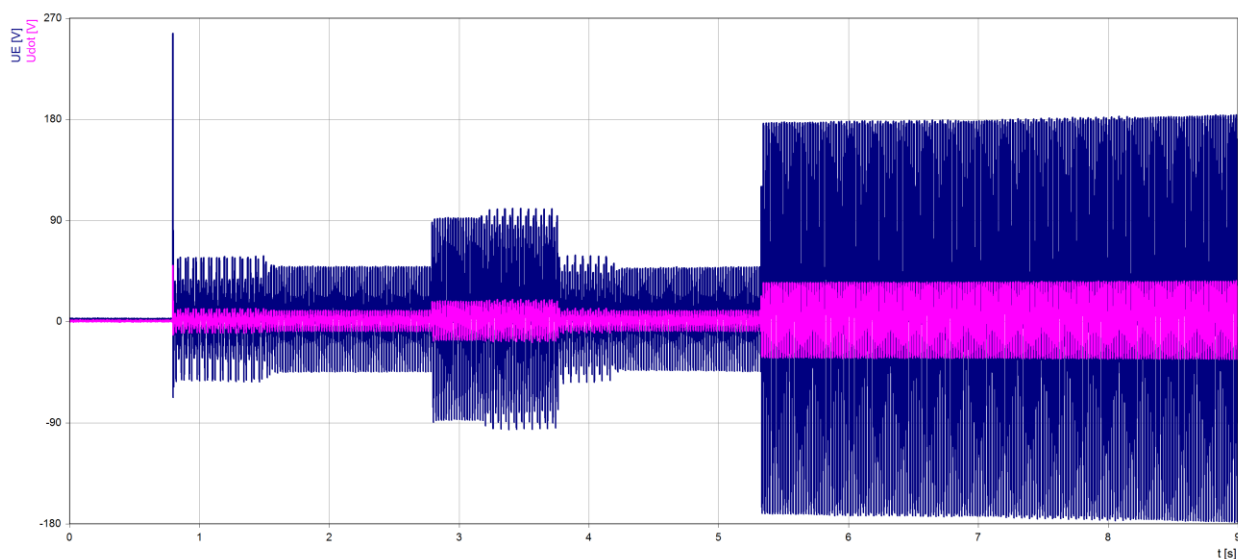
Hodnoty navýšení potenciálu na uzemnění DTS (*Obr. 9 - 8*) a dotykového napětí byly do okamžiku poruchy nulové, avšak při vzniku poruchy navýšení napětí potenciálu přesáhlo 181 V a dotykové napětí cca 35 V. Následně průběhy těchto veličin poklesly, avšak s připnutím odporníku se hodnoty zvýšily (65 V/13 V) a to následně i s přizemněním (124 V/24 V). Během experimentu hodnota dotykového napětí nepřesáhla 22% z napětí navýšení potenciálu uzemnění.



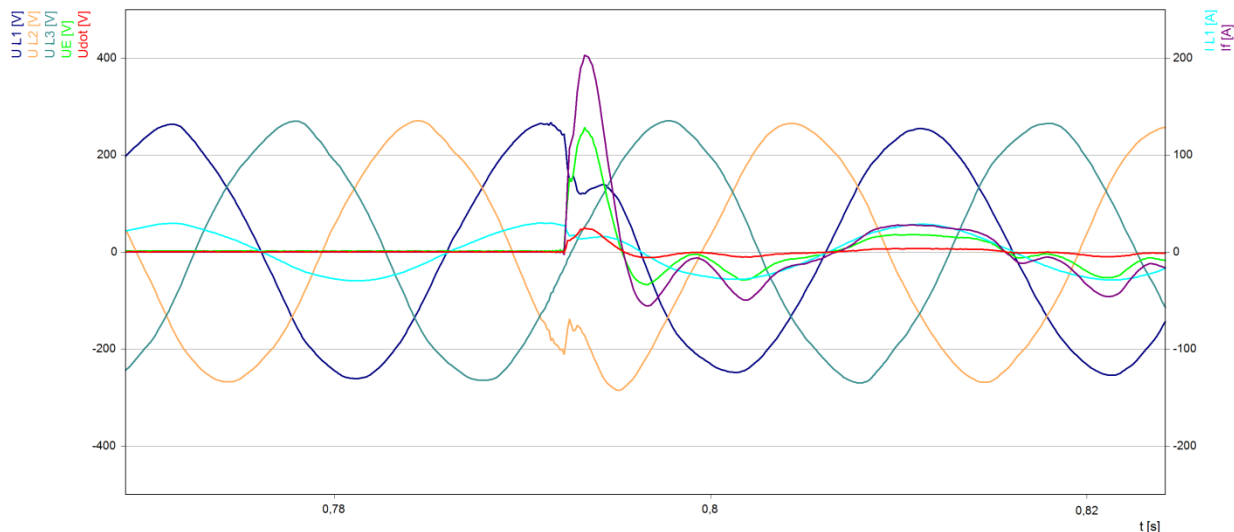
Obr. 9 - 6: Zaznamenaný průběh poruchového proudů ( $I_f$ ) během poruchy



Obr. 9 - 7: Zaznamenaný průběh efektivní hodnoty poruchového proudů ( $I_f$ ) během poruchy



Obr. 9 - 8: Zaznamenaný průběh změn potenciálu na uzemnění ( $U_E$ ) a dotykového napětí ( $U_{dot}$ )

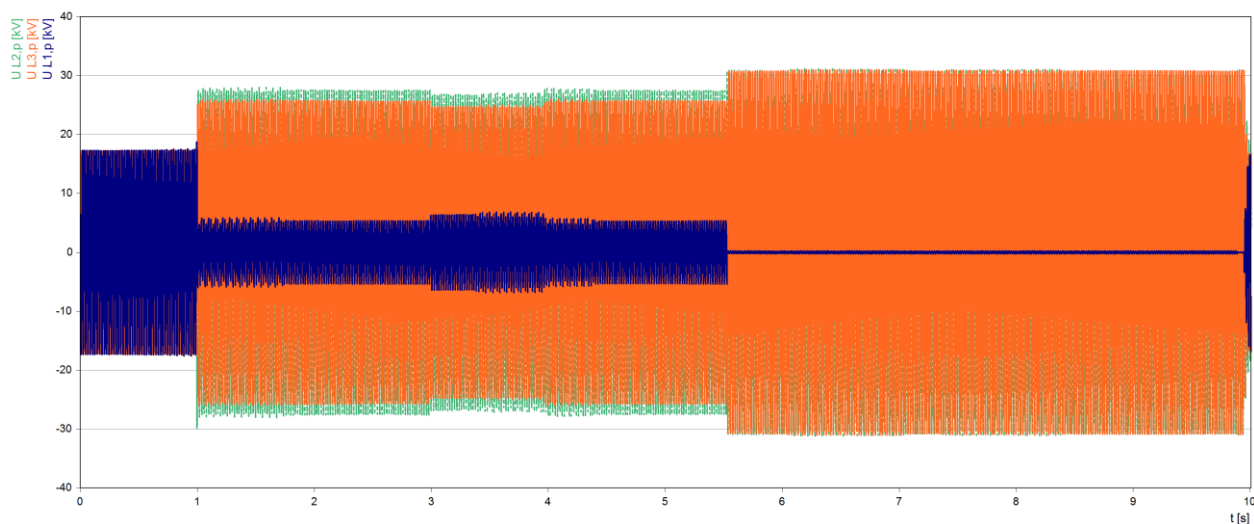


Obr. 9 - 9: Detail vybraných průběhů zaznamenaných PZ v okamžiku vzniku poruchy

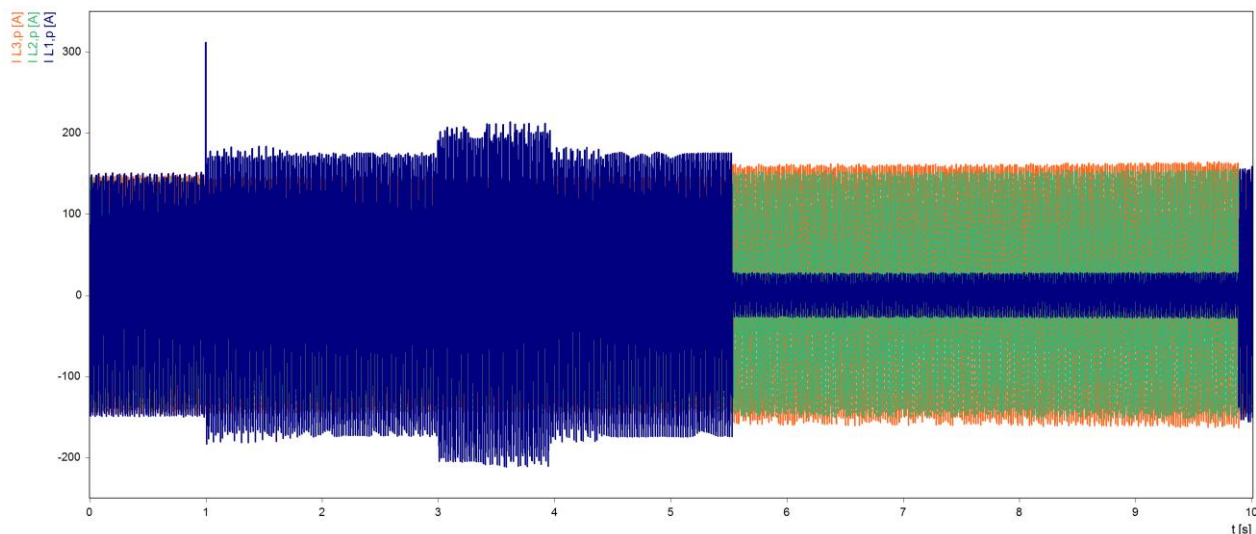
## 9.4 Vyhodnocení záznamu osciloskopem Yokogawa na straně vn

Pro zjištění pochodů v síti vn během poruchy a možnosti ověření záznamu byl proveden záznam průběhů výše uvedených napět'ových a proudových kanálů.

Průběhy napětí na výstupu z rozvodny mají před poruchou fázovou hodnotu 12,4 kV (amplituda cca 17,5 kV, sdružené napětí činí 21,5 kV). V čase  $t = 1$  s, kdy došlo ke vzniku poruchy, dochází ke značnému poklesu napětí ve fázi L1 a to na 3,8 kV a ke značnému nárůstu napětí ve fázích L2 a L3 na 18,9 kV, resp. 17,5 kV. V čase  $t = 3$  s, kdy je připnut pomocný odporník, lze pozorovat nárůst napětí v postižené fázi na  $U_{L1,p} = 4,5$  kV a pokles v nepostižených fázích o cca 1 kV. Po odepnutí odporníku se hodnoty napětí vrátili na předchozí úroveň. V čase 4,5 s po vzniku poruchy je postižená fáze automaticky přizemněná, což má za následek pokles napětí v postižené fázi L1 na nulu a nárůst napětí v nepostižených fázích na sdruženou hodnotu původního napětí.

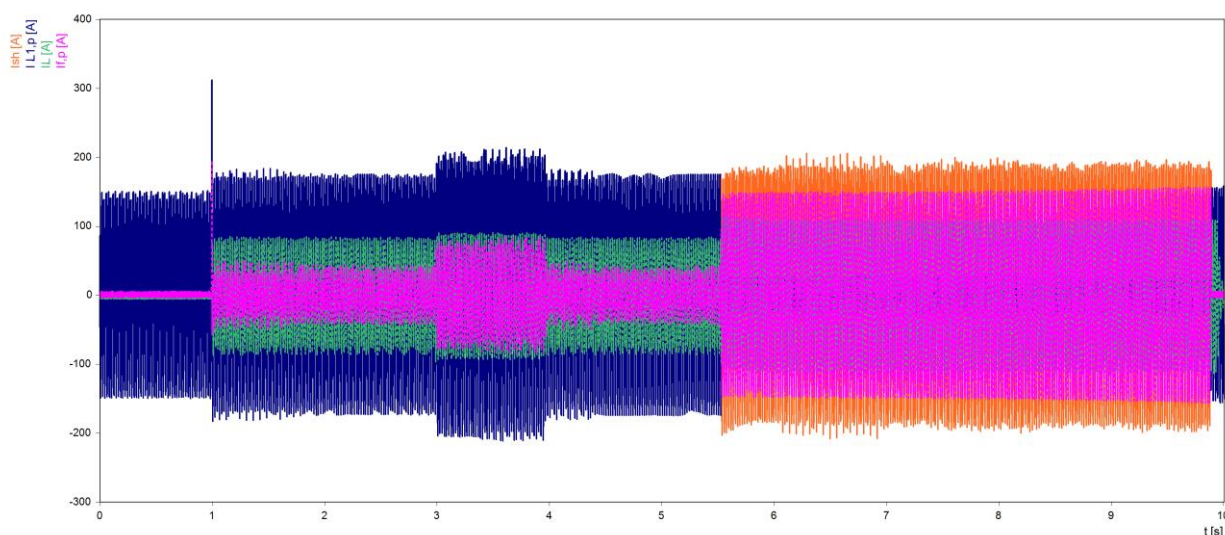


Obr. 9 - 10: Zaznamenané průběhy napětí ( $U_{L1,p}$ ,  $U_{L2,p}$ ,  $U_{L3,p}$ ) během poruchy



Obr. 9 - 11: Zaznamenané průběhy napětí ( $I_{L1,p}$ ,  $I_{L2,p}$ ,  $I_{L3,p}$ ) během poruchy

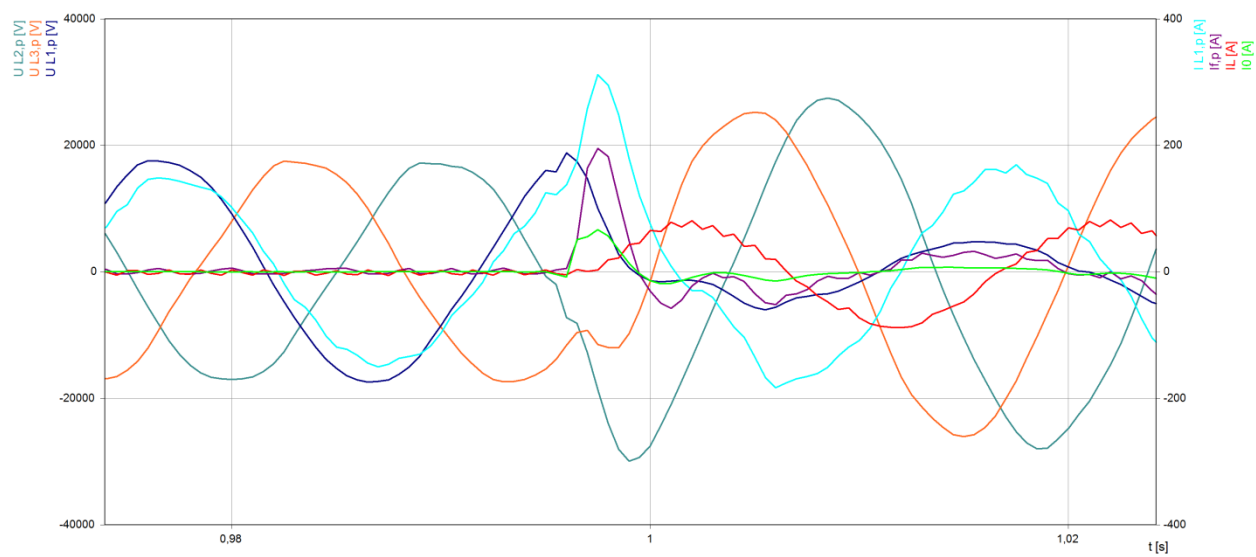
Na průbězích proudů na straně vn (Obr. 9 - 11) lze v okamžiku vzniku poruchy pozorovat vznik proudové špičky 312 A v postižené fázi L1. Efektivní hodnota proudu ve fázi L1 následně klesne na hodnotu 130 A. V nepostižených fázích nedošlo k žádné změně hodnot protékajících proudů. Protože v moment připnutí pomocného došlo ke snížení impedance cesty poruchového proudu, došlo současně k nárůstu proudu postiženou fází L1 na  $I_{L1,p} = 146$  A. Po odepnutí odporníku se hodnota proudu vrátila na původní hodnotu. Ve chvíli, kdy došlo k přizemnění postižené fáze, klesl proud postiženou fází na 19,4 A, kdežto proudy v nepostižených fázích stouply na hodnotu 105 A ve fázi L2 a 112 A v L3.



Obr. 9 - 12: Zaznamenané průběhy proudů ( $I_{L1,p}$ ,  $I_{sh}$ ,  $I_L$ ,  $I_f$ ) během poruchy

Na Obr. 9 - 12 lze pozorovat průběh poruchového proudu  $I_f$ , který dosáhl během vzniku proudové špičky 203 A (hodnota odpovídá naměřené PZ). Na tomto průběhu je také dále vidět pokles proudu tekoucího místem poruchy souběžně s nárůstem proudu tekoucím zhášecí tlumivkou (cca 60 A). Připnutím odporníku dochází ke zvýšení poruchového proudu tekoucího do rozvodny resp. fází s poruchou L1. Po přizemnění postižené fáze došlo v sestaveném modelu k situaci, ve které odběrový proud protékal převážně přes šentovací odpor, zemi, uzemnění DTS a místem poruchy do zátěže. Tento jev nastal z důvodu, že impedance této vodivé cesty byla

podstatně menší než impedance vedení vn. Na Obr. 9 - 13 je vyobrazen detail průběhů v okamžik vzniku poruchy.



Obr. 9 - 13: Detail vybraných průběhů v okamžik vzniku poruchy

## 10 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce je návrh a především realizace funkčního poruchového záznamníku pro distribuční trafostanice vn/nn. První část práce je věnována rešerši ohledně problematiky provozu a poruch distribučních trafostanic vn/nn. Dále jsou zde objasněny principy analytických metod, na základě kterých je možné rozpoznat poruchu v síti. Pro komplexní funkčnost poruchového záznamníku je v rámci této teoretické části práce také proveden průzkum ohledně technické stránky zpracování signálu, jednotlivých způsobů detekce poruch a samotného provedení záznamu.

Ve druhé části práce je proveden návrh vlastního řešení poruchového záznamníku, který je schopen automaticky detekovat poruchový stav v síti vysokého napětí na základě sledování poměrů na nízkonapěťové straně trafostanice. Tento návrh řeší koncepci poruchového záznamníku zejména výběr měřících kanálů, návrh podsystému pro sběr dat, jejich vyhodnocování a zaznamenávání a datový tok mezi těmito celky.

Na tento principiální návrh navazuje stěžejní praktická část práce a to realizace softwaru poruchového záznamníku v prostředí LabVIEW, který spolupracuje s vybraným měřícím příslušenstvím CompactDAQ. Postupně byl vyvinutý poruchový záznamník, který sleduje a během poruchy zaznamenává průběhy napětí a proudů na straně nízkého napětí, hodnoty dotykových napětí v trafostanici a dalších volitelných veličin. Klíčovou funkcí záznamníku je samotná detekce poruchy, která je založena na základě sledování úrovně zpětné složky napětí. V případě, že záznamník detekuje překročení nastavené úrovně této zpětné složky napětí, je stav sítě shledán jako poruchový a dojde k vydání příkazu pro spuštění záznamu. Tomuto vyhodnocovacímu procesu předchází aplikace rychlé Fourierovy analýzy pro výběr základní harmonické složky a následně analýza rozkladem do souměrných složek. Pro provedení korektní analýzy zaznamenaných poruch, včetně detailu jejich vzniku a pochodů v síti, záznamník vytváří záznam přímo měřených hodnot, který je složen ze dvou částí. První část záznamu obstarává tzv. buffer, který po omezenou dobu zpětně uchovává část monitorovaných průběhů a jehož chod je v případě poruchy zastaven. Za takto získaná data, postihující předporuchový stav a okamžik vzniku poruchy, jsou postupně zaznamenávána aktuální data během poruchy. Jakmile záznam dosáhne nastavené délky, záznamník ukončí sběr dat a provede uložení zaznamenaných dat a nastavení záznamníku do tabulkových souborů. Tato data mohou být následně zpracována příslušnými analýzami v rámci post-processingu.

S poruchovým záznamníkem byly následně prováděny provozní zkoušky, na základě kterých byl záznamník postupně optimalizován a rozšířen. Hlavním účelem optimalizace bylo provést takové úpravy, aby byl chod softwaru maximálně stabilní a prostředí uživatelsky přívětivé. Dále byla zkrácena doba vyhodnocovacího procesu pro detekci poruchy na 100 ms a bylo provedeno rozšíření funkčnosti záznamníku. Toto rozšíření v první řadě představovalo možnost detekce poruchy na základě vyhodnocování úrovně vybrané vyšší harmonické složky napětí. Další rozšíření se týkalo přidání funkcí pro možnost manuálního spuštění záznamu a záznamu více poruch, případně poruch delších než je maximální délka záznamu. Nicméně je vhodné podotknout, že i přes stabilní chod byly během zkoušek zjištěny mírné nedostatky realizovaného záznamníku, které pramenily zejména z nemožnosti nastavit libovolnou vzorkovací frekvenci měřícího příslušenství a z relativně vyšší výpočetní náročnosti.

V následující části práce je zpracován detailní popis finálního prostředí, jednotlivých nastavení a funkcí poruchového záznamníku. Tato kapitola je zpracována tak, aby mohla být

použita jako návod k obsluze záznamníku. Čtenář je postupně seznámen s jednotlivými funkcemi a nastaveními záznamníku. Stručný postup nastavení a nápověda jsou také uvedeny v uživatelském prostředí.

Závěrečná část práce se věnuje ověření funkce realizovaného poruchového záznamníku. Za tímto účelem byl proveden experiment, který měl přibližně odpovídat reálné situaci a pochodům v elektrické síti během poruchy v síti vysokého napětí. Pro tento experiment byl sestaven model kompenzované sítě vn, která napájela fiktivní distribuční trafostanici s instalovaným poruchovým záznamníkem. V tomto případě záznamník monitoroval kromě fázových napětí a proudů i hodnotu poruchového proudu, hodnotu navýšení potenciálu zemnicí soustavy a dotykového napětí. Detekce poruchového stavu byla založená na překročení nastavené úrovně zpětné složky napětí. Pro vyhodnocení správnosti funkce a jim zaznamenaných hodnot byl na výstupu z modelu rozvodny vvn/vn instalován osciloskop s možností záznamu. Bylo provedeno několik simulací poruch a navržený poruchový záznamník poruchový stav vždy vyhodnotil správně a provedl záznam monitorovaných průběhů. V této části práce je dále také proveden popis jedné vybrané poruchy a záznamů provedených záznamníkem a osciloskopem. Tyto zaznamenané průběhy odpovídají očekávaným a lze tedy zhodnotit, že požadovaný účel detekce poruchy a provedení záznamu navržený poruchový záznamník splňuje.

V práci prezentovaný poruchový záznamník je schopen korektně detekovat poruchy v sítích vysokého napětí a může v oblasti zaznamenávání poruchových jevů do určité míry nahradit mnohonásobně dražší a komplikovanější zařízení, jejichž provoz může vyžadovat přítomnost obsluhy. V rámci dalšího vývoje by tento poruchový záznamník mohl být rozšířen o další funkce pro detekce poruch, případně s příslušnými změnami by mohl být teoreticky aplikován i přímo v sítích vysokého napětí. Další vhodnou možností rozšíření by byla funkce pro načtení zaznamenaných hodnot a provedení příslušných analýz přímo v prostředí záznamníku. Vzhledem k potenciálu platformy CompactDAQ-LabVIEW existuje také prostor pro rozšíření aplikace záznamníku pro vyhodnocování a zaznamenávání nejen v oblasti elektrických poruch.

**POUŽITÁ LITERATURA**

- [1] TOMAN, P., DRÁPELA J., MIŠÁK S., ORSÁGOVÁ J., PAAR M. A TOPOLÁNEK D. Provoz distribučních soustav. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [2] ČSN 33 0121 (330121). Elektrotechnické předpisy - Jmenovitá napětí veřejných distribučních sítí nn. oprava 2 08.13. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [3] KALÁB, P. Bezpečnost v elektrotechnice. Vyd. 4., přeprac. Brno: Vysoké učení technické, 2003, 77 s. ISBN 978-80-214-3509-4.
- [4] ČSN ISO 33 2000 4-442. Ochrana zařízení nn při zemních poruchách v síti vysokého napětí. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [5] ORSÁGOVÁ, J. Elektrické stanice a vedení. Brno: VUT, 157 s.
- [6] Rozvoj distribučních sítí a technologických prvků ve skupině ČEZ a.s.: Koncepce transformačních stanic vn/nn. ČEZ a.s. Praha, 2006. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/technicke-informace/priloha-3.doc>
- [7] Souhrnný katalog: Kočí - Valášek. In: [www.transformatory.cz](http://www.transformatory.cz) [online]. [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: <http://www.transformatory.cz/files/file/souhrnny-katalog-KV.pdf>
- [8] VÁPENÍK, R. Regulace napětí v distribuční soustavě vn a nn. Praha: Elektrevue, 2011. Dostupné z: <http://www.elektrevue.cz/file.php?id=200000599-5a5255b4c5>
- [9] PROVOZNÍ NÁVOD: 3-FÁZOVÉ DISTRIBUTUČNÍ HERMETIZOVANÉ TRANSFORMÁTORY ELIN PLNENÉ MINERÁLNÍM OLEJEM. In: Trafo CZ [online]. [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: <http://www.trafocz.cz/pdf/navod-elin.pdf>
- [10] SEDLÁČEK, J.. Elektrotechnika II [online]. 3. přeprac.vyd. Brno: Vutium, 2004, 143 s. [cit. 2014-01-03]. ISBN 80-214-2573-3. Dostupné z: [http://www.utee.feec.vutbr.cz/files/predmety/BEL2/Multimed\\_uc/Elektrotechnika\\_2.pdf](http://www.utee.feec.vutbr.cz/files/predmety/BEL2/Multimed_uc/Elektrotechnika_2.pdf)
- [11] TOMAN, P. Teorie souměrných složek: Prezentace přednášky předmětu BDEE. FEKT, VUT v Brně, 2012.
- [12] TLUSTÝ, J., ŠVEC J., P. BANNERT, Z. BRETTSCHEIDER, Z. KOCUR Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí :. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2011, 253 s. ISBN 978-80-01-04939-6.
- [13] MERRY, R.J.E. Wavelet Theory and Applications: A literature study [online]. 2005 [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/5500.pdf>
- [14] KOMRSKA, T. Estimátor základní harmonické napětí a proudu na bázi diskrétní Fourierovy transformace. Plzeň, 2010.
- [15] IBRAHIM, M. A. Disturbance analysis for power systems. Hoboken, N.J.: Wiley, c2012, xviii, 717 s. ISBN 978-0-470-91681-0.
- [16] PNE 33 0000-1. Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribučních soustavách a přenosové soustavě: Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie. 5. vyd. Praha, 2011. Dostupné z: [http://www.csres.cz/Upload/PNE\\_33\\_0000\\_1\\_ed.5.pdf](http://www.csres.cz/Upload/PNE_33_0000_1_ed.5.pdf)
- [17] Perez, J.; Rincon, C. "A guide to transformer digital fault recording event analysis", Protective Relay Engineers, 2012 65th Annual Conference for, s.: 358 – 373 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5469501>

- [18] Considerations for Use Of Disturbance Recorders. Report to the System Protection subcommittee of the IEEE Power System Relay Committee [online]. 2006 [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: <http://www.pes-psrc.org/Reports/C5-Final%20Report.pdf>
- [19] SMITH, Steven W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. San Diego: California Technical Publishing, 2011. Dostupné z: <http://www.dspguide.com/CH3.PDF>
- [20] LabVIEW Wiki [online]. 2011 [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: <http://labviewwiki.org/Home>
- [21] TOPOLÁNEK, D., ORSÁGOVÁ J., TOMAN P., Vliv provozu kompenzovaných sítí velkého kapacitního rozsahu na velikost dotykových napětí. Tábor, 2012, CIRED 2012.
- [22] Haishen Zhang; Zhengyou He; Sheng Lin; Xiaojiang Li, "Fault record and analysis system based on LabWindows/CVI," Electronic Measurement & Instruments, 2009. ICEMI '09. 9th International Conference on , vol., no., pp.1-767,1-772, 16-19 Aug. 2009
- [23] What Is NI CompactRIO?. [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.ni.com/compactrio/whatis/>